



·粒子束及加速器技术·

上海软 X 射线自由电子激光装置直线加速器 束流位置测量系统研制*

吴 桐^{1,2}, 赖龙伟^{1,3}, 俞路阳^{1,3}, 袁任贤^{1,3}, 陈 健^{1,3}, 阎映炳^{1,3}, 冷用斌^{1,2,3}

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

摘 要: 上海软 X 射线自由电子激光装置 (SXFEL) 作为中国第一台工作在软 X 射线波段的第四代光源, 其产生的激光具备短波长、全相干、超高亮度、超短脉冲长度等优点, 预期将会在基础科学研究领域中发挥出重要的作用。基于直线加速器的特点和需求, 在 SXFEL 的注入器与直线加速段上选择了条带型束流位置测量系统 (SBPM) 作为束团位置测量工具。该系统由 SXFEL 束测团队自主研发设计, 由条带探头、前端信号调理电子学与专用数字信号束流位置处理器 (DBPM) 组成, 系统设计上借鉴上海同步辐射光源 (SSRF) 的同类型设备, 并根据 SXFEL 的特点做了进一步的优化, 束流实验结果表明该系统位置测量系统分辨率好于 $5.7 \mu\text{m}@188 \text{ pC}$, 达到国际先进水平, 满足了 SXFEL 注入器和直线加速器段对束流位置测量分辨率的设计要求。

关键词: 上海软 X 射线自由电子激光; 束测; 束流位置测量; 条带型; 数字信号处理

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210015

Design of stripline beam position monitor for Shanghai soft X-ray free electron laser

Wu Tong^{1,2}, Lai Longwei^{1,3}, Yu Luyang^{1,3}, Yuan Renxian^{1,3}, Chen Jian^{1,3}, Yan Yingbing^{1,3}, Leng Yongbin^{1,2,3}

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: Shanghai Soft X-ray Free Electron Laser (SXFEL) is the first fourth-generation light source in China that can work in soft X-ray band. With the advantages of short wavelength, full coherence, ultra-high brightness, and ultra-short pulse, it is expected to play an important role in basic science research. Based on the characteristics of the linear accelerator, the stripline beam position monitor (SBPM) was selected as the beam position measurement tool in the injection section and the straight section. The system is mainly composed of the probe, the front-end electronics system, and the digital beam position monitor (DBPM). The design draws on the same type of device from Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) and is further optimized according to the characteristics of SXFEL. Finally, the beam experiment results show that the resolution reaches $5.7 \mu\text{m}@188 \text{ pC}$, which meets the requirements for beam position resolution of SXFEL.

Key words: Shanghai Soft X-ray Free Electron Laser; beam diagnosis; beam position monitor; stripline; signal processing

上海软 X 射线自由电子激光装置 (SXFEL) 于 2014 年开始建设, 现已完成实验装置 (SXFEL-TF) 的安装与调试。在将来, 结合用户装置的建设, SXFEL 有望能进一步促进中国自由电子激光领域的发展, 在科学研究领域发挥更大的作用^[1]。根据 SXFEL 物理设计提出的指标要求, 在注入器和主加速器段需要安装 35 个条带型束流位置测量系统 (SBPM) 探头用于束流位置的精确测量, 其中 9 个位于注入器段 (真空室孔径 25 mm), 26 个位于主加速器

* 收稿日期: 2021-01-15; 修订日期: 2021-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFA0401903, 2016YFA0401900) 中国科学院青年创新促进会项目 (2019290)

作者简介: 吴 桐 (1993—), 男, 博士研究生, 核技术及应用专业, 从事束流检测与控制研究。

通信作者: 赖龙伟 (1985—), 男, 博士, 副研究员, 核技术及应用专业。

段(真空室孔径 16.25 mm)。建成后的系统当束团电荷量为 500 pC 时,位置分辨率需要好于 10 μm(记为 10 μm@500 pC),且运行稳定可靠。

在制定这一目标时,对于世界主要同类装置上 SBPM 装置进行了调研。美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的直线加速器相关光源(LCLS)上 SBPM 在测试中分辨率能够达到 5 μm@200 pC,韩国浦项 X 射线自由电子激光(PAL XFEL)、德国汉堡自由电子激光(FLASH)、美国费米国家实验室光源(FERMI@Elettra)^[2-6]上的同类型一起分辨率也在相似水平上。因此,这一目标具备相当可行性。

本文将从测量原理开始对 SXFEL 上安装的 SBPM 系统进行介绍,并分别从硬件系统与软件系统两方面对于 SBPM 的系统构架及各子系统的设计与研制工作进行介绍。

1 条带型束流位置测量系统测量原理

束团经过条带型束流位置测量系统(SBPM)测量区域时,金属管道内壁上会产生镜像电流,其大小分布由束团电荷量、束团粒子密度分布决定。在内壁内侧设置与管道绝缘的电极可以对镜像电流信号进行测量^[7]。上海软 X 射线自由电子激光装置(SXFEL)上使用的 SBPM 探头的结构示意图如图 1 所示。当束团以接近光速的速度平行电极通过待测区域时,若束团靠近电极物理中心,电极上产生的电压信号随时间 t 变化的函数可表示为

$$V(t) = \frac{\phi Z}{4z} \left[e^{\frac{-t}{2\sigma^2}} - e^{\frac{-(t-\frac{2l}{c})}{2\sigma^2}} \right] \frac{eN}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (1)$$

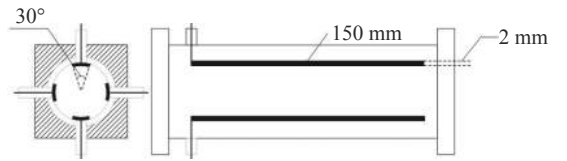


Fig. 1 Schematic of stripline BPM probe
图 1 条带型束流位置探头示意图

该信号在时域上表现为双极性信号,分别代表束团经过电极上下端口时,在电极上产生的感应电动势(一部分相互抵消)。其中: Z 代表电极特性阻抗; l 为电极长度; N 代表束团中粒子数量; σ 为束团标准差(RMS)长度; ϕ 代表电极对束团张角, c 代表光速(对于自由电子激光装置中的相对论性电子,可以认为其速度近似为光速),当束团在接近中心处变化时, ϕ 的变化量与束团横向位置的变化量接近线性关系。当电极加工精度与安装精度足够高时,探头上测得电压信号是一个由束团横向位置与束团电荷量分布决定的时域变化信号。

一组相对于管道中心对称的电极上测得信号经差比和计算后能得到束团沿电极中心连线上的相对位置,其关系可由式(2)近似表示(理论上,差比和处理后的位置信号与束团电荷量无关,仅仅反应束团位置信息。但是束团电荷量影响探头上测量到的电压信号幅度,其信噪比会影响测量精度)。在另一方面,由于 SBPM 探头上测得的电压信号幅度与束团电荷量成正比,SBPM 系统也可以用于束团电荷量的相对性测量。

$$Y = \frac{V_a - V_c}{V_a + V_c} \approx \frac{4\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)y}{\varphi b} \quad (2)$$

式中: Y 代表束团垂直方向位置测量值(水平方向位置的测量同理),而 y 代表束团垂直方向位置, b 代表真空室半径, φ 代表电极张角, V_a 与 V_c 分别代表垂直方向两探头测得信号幅度。从式(2)可以得出,束团位置 y 与位置测量值 Y 在公式所示范围内比值一定,其比值可以用探头标定系数表示。

2 硬件系统

2.1 系统架构

一套 SBPM 测量系统硬件上主要包括管道内探头、管道外电子学(包括射频信号调理模块和数字采样与处理模块,一般会整合为一体化的数字化束流位置信号处理器(DBPM)系统)及连接电缆三个主要部分,并最后通过以太网与主控网连接,整体系统框图如图 2 所示。

根据 SXFEL 设计需求,需要在主加速器前后总计安装 35 台 SBPM。这些探头分布在较大的空间内,因此整个测量系统采用了分布式的数据采集处理结构。管道外的技术走廊中一共有 4 个束测本地站,每个本地站对应最多 9 套 SBPM 采集系统。同一本地站的 SBPM 系统由一套定时扇出模块提供触发信号,测得信号统一由机架式交换机上传到主控网络中。探头上产生的信号经引出后通入管道外电子学部分,在完成信号的滤波、增益调整、数字采样与信号处理后接入主控网。

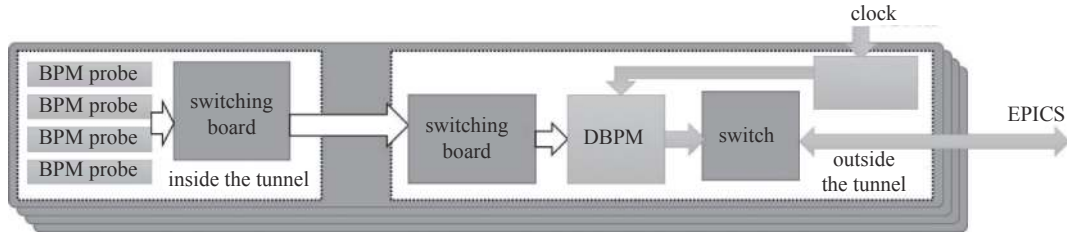


Fig. 2 Diagram of SBPM system hardware composition

图 2 SBPM 系统硬件组成示意图

2.2 束流探头设计与研制

提高 SBPM 系统的测量精度, 首先必须优化其电极结构, 基本判据是在满足测量分辨率、对束流的影响可接受的情况下, 确定束流探头的张角、厚度、长度, 并使其电极特性阻抗与信号输出阻抗 50Ω 相匹配。

对于 SXFEL 上 SBPM 探头的设计, 由于真空段束流清晰区半径为 12.5 mm , 因此将电极距离管道中心的距离优化在 12.5 mm , 在避免影响束流清晰区的条件下尽量提高待测信号功率。为减小电极间信号的耦合, 电极张角不宜过大; 同时, 由于输出信号幅度正比于电极张角, 更大的电极张角会带来更好的信噪比。综合考虑下, 将电极张角设为 30° 。电极厚度的选择主要影响电极的机械强度, 根据上海同步辐射光源 (SSRF) 上的经验选择了 2 mm 。电极长度会影响系统工作频率, 在这里选取了 150 mm , 此时输出信号的频谱分布曲线如图 3 所示, 纵坐标表示输出信号对应频率成分相对幅度大小。

在其他条件确定的情况下, 电极特性阻抗与真空室半径成正比关系, 其关系曲线如图 4 所示。对应 50Ω 特性阻抗的真空室半径为 16.4 mm , 实际使用时由于近似公式的偏差, 该尺寸选定为 16.25 mm 。

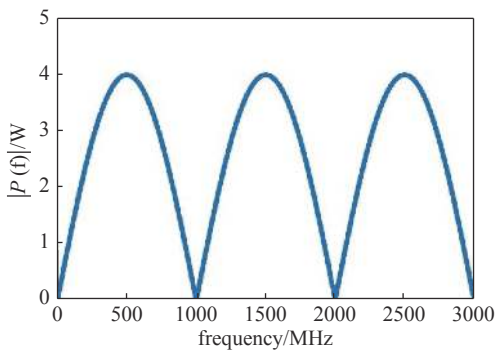


Fig. 3 Signal frequency domain response

图 3 探头信号频域响应

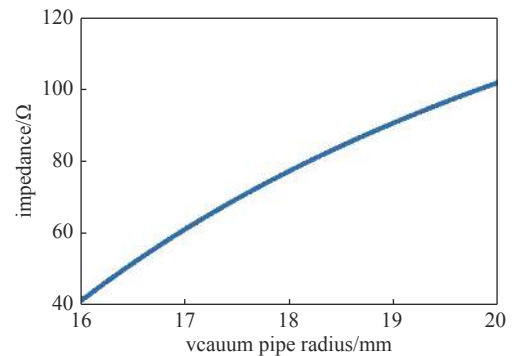


Fig. 4 Function of vacuum chamber radius and impedance

图 4 真空室半径与特性阻抗的关系

2.3 电子学设计

2.3.1 射频前端电子学

射频前端电子学选择了窄带滤波的信号调理设计方案^[8], 其构成如图 5 所示, 经过精简后可在一块单独的射频子板上实现全部功能, 并便于整合进 DBPM 系统中。

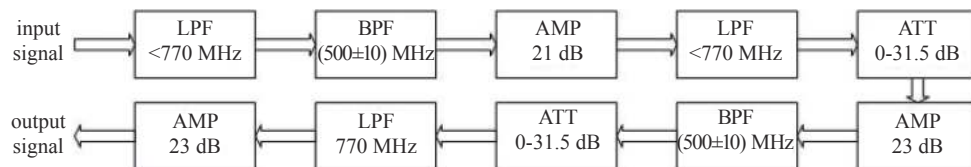


Fig. 5 Schematic of radio frequency signal conditioning electronics

图 5 射频前端调理模块示意图

射频前端调理电路的功能主要为对信号进行滤波与增益调整。滤波电路将滤除待测信号中 $(500 \pm 10) \text{ MHz}$ 以外的其他频率成分, 由于带通滤波器对远端噪声的抑制作用不太理想, 因此加入了三级低通滤波器。增益模块的功能为将滤波后的信号幅度调整到与模拟数字转换器 (ADC) 量程相匹配, 同时提供一定的增益动态调整范围。因此在信号增益模块内安装有三个增益固定的放大器 (串联后合计提供约 67 dB 的增益) 与两个可调衰减器

(串联后其可调衰减范围为 0~63 dB)。除此之外, 电路上的其他器件也会产生约 8 dB 的固定衰减。信号增益调整模块最终提供的最小增益约为-4 dB, 最大增益约为 59 dB, 动态范围为 63 dB。

经过调理后的模拟信号由美国 Analog Devices 公司的 AD9265 芯片转为数字信号, 该芯片具有 4 独立通道、16 bit 采样位数、最高采样率 125 MHz、DC~650 MHz 宽带宽的特性。

2.3.2 数字采样与信号处理电子学

电子学部分采用了自主研制的 DBPM 系统, 使用一体化嵌入式结构。其中集成了射频信号调理、模数转换、数字信号处理及数据采集与控制功能, 其结构如图 6 所示。DBPM 中的数字母版以可编程逻辑阵列(FPGA)芯片 Xilinx XC5VSX50T 和微处理器(ARM)芯片 Freescale iMX6q 为核心, 主要实现数据传输、信号处理及系统控制功能。

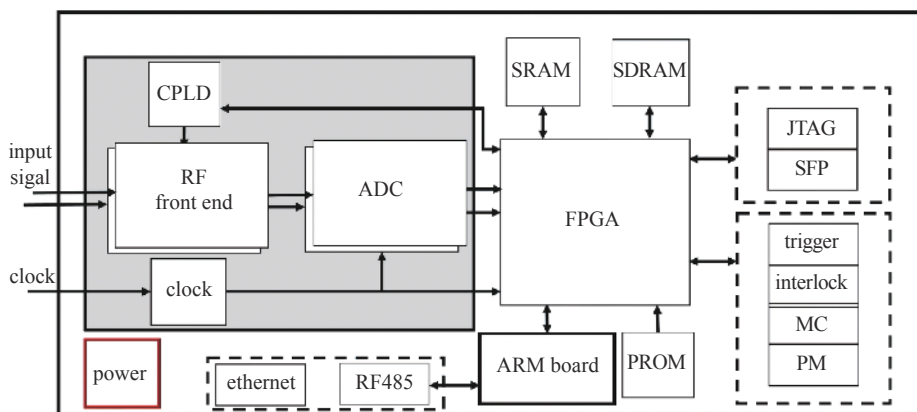


Fig. 6 Frame of signal processing unit in digital BPM

图 6 数字 BPM 电子学系统构架

在实际使用中, 为了避开主频率成分的四分频 125 MHz, 以减少 ADC 采样过程中可能引入的噪声, 选择让 ADC 工作在 117 MHz 的频率下, 其典型测量波形如图 7 所示。

3 软件系统

依据 SXFEL 的设计需求, 软件系统的处理速率需要达到 50 Hz 以上。因此, 研制 SBPM 软件系统的过程中, 参照上海光源上同类型仪器的设计经验^[9-11]并进行了优化。最终研制的 DBPM 系统处理速率能达到 120 Hz^[12-14]。

3.1 系统架构

处理器的固件和软件构架如图 8(a)所示。控制中心通过文件管理系统与 SBPM 系统进行交互, 通讯与数据交换功能依靠 ARM 芯片通过实验物理及工业控制系统(EPICS)进行。因此, ARM 芯片内置有 EPICS 控制反转(IoC)接口以及匹配硬件的驱动程序。为了提高数据处理速率, DBPM 的信号处理功能主要在 FPGA 内实现, 包括数字信号处理逻辑(DSP)、系统控制逻辑(control)和接口逻辑(PCIE, RAM, SPI)。

3.2 数据流图

DBPM 系统最终会输出三种信号: 低触发 ADC 原始数据、束团位置信息、连续 1024 次触发的 ADC 原始数

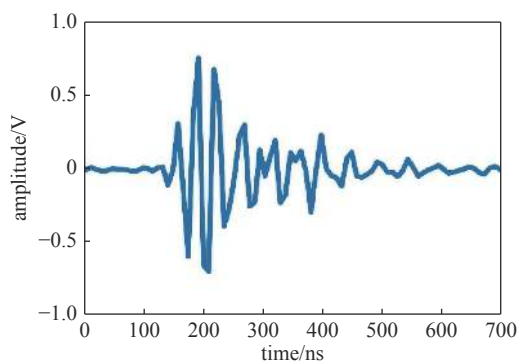


Fig. 7 Waveform measured by ADC

图 7 ADC 实测波形

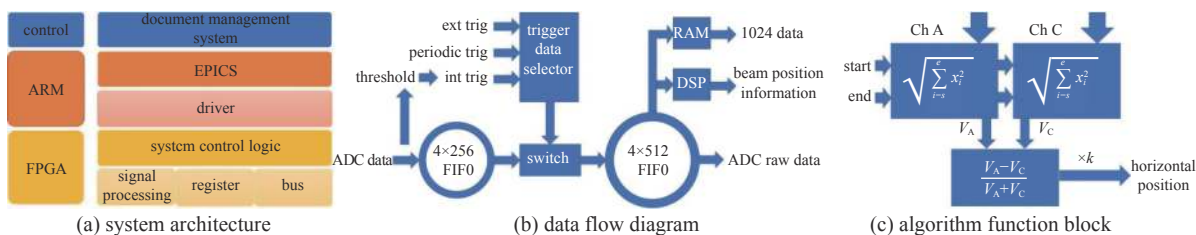


Fig. 8 Software system diagrams

图 8 软件系统示意图

据。为了对齐每次触发时存储的信号,这里设计了一个两级先入先出队列(FIFO)结构进行数据存储,具体数据流程图如图 8(b)所示。

3.3 信号处理算法

ADC 采集到的数据需要经过处理后才能得到精确的束团位置信息。考虑到使用窄带滤波信号调理方案时,调制后的信号频率持续时间较长,在具体测量时选择以特定时间窗口内测得信号的功率值作为测量值。以 ADC 上两通道数据为例,信号处理流程如图 8(c)所示。

4 运行测试

对 SBPM 系统位置分辨率的测试借助漂移段上间距相等的连续三个条带 BPM 探头进行,实际测试结构如图 9 所示。

三套 SBPM 系统对同一束团同时进行数据采集处理。束团在漂移段中不改变前进方向,由几何关系可知,当系统一致性达到要求时,束团经过两侧的 SBPM1 和 SBPM3 时位置的平均值与经过 SBPM2 时的位置一致。此时 SBPM 系统的位置测量分辨率 δ_{SBPM} 与三个 SBPM 探头所测得信号的关系可表示为

$$\delta_{\text{SBPM}} = \delta_{\text{GF}} \times \text{std}(\Delta D) \quad (3)$$

式中: δ_{SBPM} 为分辨率, δ_{GF} 为标定系统的几何因子, ΔD 为位置水平方向期望值与测量值之差。其中

$$\Delta D = \frac{D_1 + D_3}{2} - D_2$$

$$\delta_{\text{GF}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 + 1}}$$

式中: D_1 、 D_2 、 D_3 分别代表 SBPM1、SBPM2、SBPM3 中的束流位置测量值。由图 9 可知,SBPM1 与 SBPM3 测得束流位置平均值应与 SBPM2 测得束流位置相同,它们之间的差值是三个 SBPM 系统测量误差的集合,与单个 SBPM 系统测量误差的比值由标定系统的几何因子描述。

测试实验分别在 188 pC、50 pC 与 9 pC 条件下进行。图 10(a)列出了其中一组典型测试结果,可以看到,SBPM2 所测得束团位置与 SBPM1 和 SBPM3 所测得束团位置的平均值成严格正相关,其偏离值也基本满足高斯分布。根据束流实验所计算出的位置分辨率如表 1 所示,所用探头的标定系数 $K=5.24 \text{ mm}$ (K 表示位置转换因子,为束团位置与 SBPM 测量结果的比值),在电荷量 188 pC 时,空间位置测量分辨率可达到 $5.7 \mu\text{m}$,好于设计指标 $10 \mu\text{m}@500 \text{ pC}$ 。

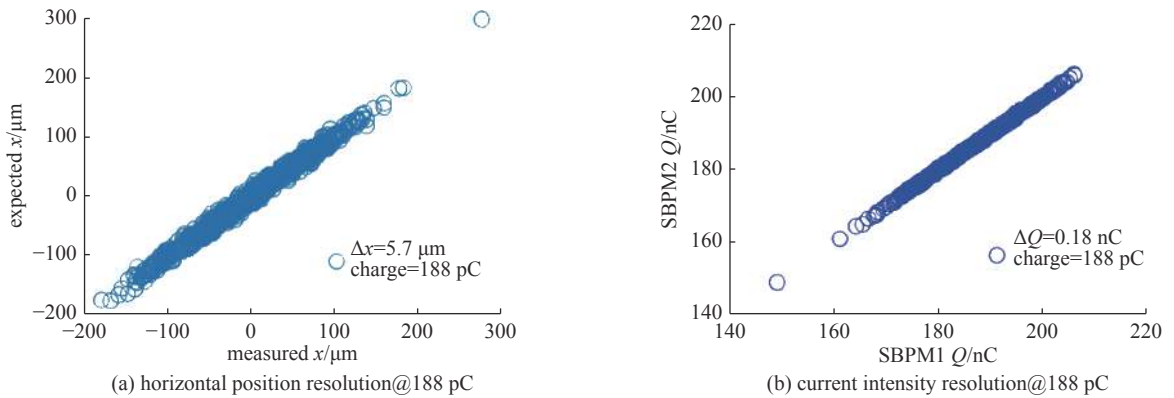


Fig. 10 Horizontal position resolution and current intensity resolution@188 pC

图 10 188pC 时束团位置分辨率和流强分辨率测量结果

由于信号幅度与束团电荷量成线性相关,SBPM 系统也可用于束团电荷量的辅助测量。如图 10(b)所示,用相邻两个 SBPM 探头上所测得的电荷量进行对比,在电荷量 188 pC 时,流强测量分辨率可达到 0.096%,对应电荷量

表 1 位置分辨率测量结果

Table 1 Stripline beam position monitor position resolution

K/mm	charge/pC	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$
	188	5.7	4.9
5.24	50	9.6	9.1
	9	51.7	65.0

分辨率 0.18 pC。

5 结 论

本文系统地介绍了 SXFEL 上 SBPM 系统的自主设计、研制过程与后期的测试工作与结果。这是国内首次开发在线工程应用的 SBPM 测量系统,在设计时解决了自研束流位置处理器的各项软硬件问题,其电子学部分采用了自主研制的 SBPM 信号处理系统,采用一体化的便携式嵌入结构,集成了射频信号调理、数据采集处理与系统控制等功能。

SXFEL 上的 SBPM 系统 2016 年底完成安装,经过一系列优化升级之后平稳运行至今,位置测量分辨率达到了 $5.7 \mu\text{m}@188 \text{ pC}$,好于设计指标 $10 \mu\text{m}@500 \text{ pC}$;对电荷量进行相对测量的分辨率能够达到 0.096%,同样优于设计指标。测试结果表明,研制的 SBPM 系统性能达到国际先进水平。

参考文献:

- [1] Wang Dong. Soft X-ray Free Electron Laser at SINAP[C]//Proc 7th Int Particle Accelerator Conf. 2016: 1028-1031.
- [2] Medvedko E, Johnson R, Smith S, et al. Stripline beam position monitors for LCLS[C]//Proceedings of Beam Instrumentation Workshop. 2008: 190-193.
- [3] Liu Xiaoyu, Wu Fangfang, Zhou Tianyu, et al. Design and offline testing of a resonant stripline beam position monitor for the IRFEL project at NSRL[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, 31(7): 1-9.
- [4] Kim C, Hong J, Kang H S, et al. Stripline beam position monitor for the PAL-XFEL[C]//6th Int Beam Instrumentation Conf. 2017: 274-277.
- [5] Baboi N, Noelle D. Commissioning of the FLASH2 electron beam diagnostics in respect to its use at the European XFEL[C]//Proc 3rd International Beam Instrumentation Conference. 2014: 712-721.
- [6] 孟鸣, 徐韬光, 李芳, 等. 中国散裂中子源直线输运束流位置测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 065104. (Meng Ming, Xu Taoguang, Li Fang, et al. Beam position monitor system in linac to ring beam transport of China Spallation Neutron Source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 065104)
- [7] 李吉浩. 合肥光源直线加速器条带BPM系统的研制[D]. 中国科学技术大学, 2006: 45-48. (Li Jihao. Development of a strip BPM system for Hefei light linear accelerator. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 45-48)
- [8] Lonza M, Cleva S, Di Mitri S, et al. Beam-based feedbacks for the FERMI@Elettra free electron laser[C]//Proc of International Particle Accelerator Conf. 2010: 2758-2760.
- [9] Chen H J, Chen J, Gao B, et al. Bunch-by-bunch beam size measurement during injection at Shanghai Synchrotron Radiation Facility[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(6): 1-9.
- [10] 赖龙伟, 冷用斌, 易星, 等. 数字束流位置信号处理算法优化[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 109-113. (Lai Longwei, Leng Yongbin, Yi Xing, et al. Optimization of signal processing algorithm for digital beam position monitor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 109-113)
- [11] Yang Yong, Leng Yongbin, Yan Yingbing, et al. Development of the bunch-by-bunch beam position acquisition system based on BEEcube[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, 27(2): 88-93.
- [12] 赖龙伟, 冷用斌, 阎映炳, 等. 自由电子激光装置数字化束流位置信号处理器研制及应用[J]. 核技术, 2018, 41(7): 43-49. (Lai Longwei, Leng Yongbin, Yan Yingbing, et al. Development and application of digital beam position measurement processor for FEL[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(7): 43-49)
- [13] 陈方舟, 赖龙伟, 阎映炳, 等. 上海光源数字化束流位置信号处理器测试平台研制[J]. 核技术, 2017, 40(11): 11-16. (Chen Fangzhou, Lai Longwei, Yan Yingbing, et al. Development of a test platform for digital beam position monitor processor at SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(11): 11-16)
- [14] Lai Longwei, Leng Yongbin, Yan Yingbing, et al. Upgrade of digital BPM processor at DCLS and SXFEL[C]//International Particle Accelerator Conference. 2018.