



·粒子束及加速器技术·

BEPC II 直线加速器数字 BPM 前端调理电路的研制

杨 静^{1,2}, 杜 垚 垚^{1,2}, 汪 林¹, 叶 强¹, 麻 惠 洲¹, 魏 书 军¹, 岳 军 会¹,
随 艳 峰^{1,2}, 高 国 栋^{1,2}, 唐 旭 辉^{1,2}, 曹 建 社^{1,2}

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对北京正负电子对撞机改造工程(BEPC II)直线加速器束流位置测量电子学系统故障率上升这一现状, 结合 BEPC II 直线加速器束流参数以及 BPM 电子学 ADC 芯片带通采样的需求, 设计了隔离度高、幅相一致性好的数字 BPM 射频前端电子学模块。数字 BPM 电子学系统采用 MicroTCA 4.0 系统架构, 以 FPGA 作为主控制器, 基于 EDA 软件开发设计。重点介绍了射频前端电子学模块中射频功率放大器、数字可调衰减器、带通滤波器等设计和实验室及在线测试结果。BEPC II 对撞模式下, 使用正电子束流, 完成电子学系统在线测试, x 方向位置测量精度约为 $38.46 \mu\text{m}$, y 方向位置测量精度约为 $26.16 \mu\text{m}$, 其测量精度和系统稳定性优于商用模拟 BPM 电子学模块, 能够满足 BEPC II 直线加速器束流位置测量需求。

关键词: BEPC II; 直线加速器; 数字 BPM; 相位可调; 射频电路

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210046

Development of digital BPM front-end conditioning circuit for BEPCII linac

Yang Jing^{1,2}, Du Yaoyao^{1,2}, Wang Lin¹, Ye Qiang¹, Ma Huizhou¹, Wei Shujun¹, Yue Junhui¹,
Sui Yanfeng^{1,2}, Gao Guodong^{1,2}, Tang Xuhui^{1,2}, Cao Jianshe^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

Abstract: Aiming to control the rising failure rate of electronics system for BEPC II linac's beam position measurement, considering the physical design parameters of BEPC II and the requirements of band-pass sampling of BPM electronics ADC chip, a digital BPM RF front-end electronics with high isolation degree and good amplitude and phase consistency is designed. The digital BPM electronics system adopts MicroTCA 4.0 system architecture, takes FPGA as the main controller, and is designed based on EDA software. This paper mainly introduces RF power amplifier, digital adjustable attenuator and bandpass filter in RF front-end electronics module, as well as the laboratory and online test results. In the collision mode of BEPC II, positron beam was used to complete the electronic system online test, and the measurement accuracy of x -direction was about $38.46 \mu\text{m}$, while that of y -direction was about $26.16 \mu\text{m}$. The measurement accuracy and system stability of the proposed method are better than that of commercial analog BPM electronics module, and can meet the beam position measurement requirements of BEPC II linac.

Key words: BEPC II; linac; digital BPM; phase adjustable; RF circuit

BEPC II 是一台聚物理能区国际领先的对撞机和高性能的兼用同步辐射装置, 其直线加速器为储存环提供最高能量为 2.5 GeV 的正负电子束流, 实现全能量注入^[1]。束流诊断系统作为粒子加速器的关键子系统对优化粒子加速器各项机器参数, 保证粒子加速器高质量稳定运行至关重要, 束流位置测量是束流诊断系统中最关键的子系统之一。BEPC II 建设之初直线加速器采用商用 Bergoz 模拟电子学系统进行束流位置诊断, 该电子学经过近二十年运行, 老化严重, 故障频发, 且进口设备成本高昂, 本文针对 BEPC II 直线加速器自主研发了一套高性能的数字

* 收稿日期: 2021-02-07; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 国家重点研发专项(2016YFA0401903)

作者简介: 杨 静(1993—), 女, 博士研究生, 从事加速器束流位置测量研究。

通信作者: 曹建社(1963—), 男, 研究员, 从事加速器束流测量技术研究。

BPM 电子学系统,以替换 BEPC II 直线加速器上现有的模拟 Bergoz 电子学系统,同时为在建的高能同步辐射光源(HEPS)上应用自研数字 BPM 电子学系统做准备。

1 系统架构

数字 BPM 电子学系统采用先进的 MicroTCA 4.0 系统架构,如图 1 所示,由位于 RTM(后端转换模块)板上的射频前端电子学模块和位于 AMC(高级夹层卡)板上的数字采集板卡以及 PC 端数据获取处理与显示等部分构成。RTM 板和 AMC 板通过 ADF(高级差分结构连接器)接口连接,实现射频前端电路与数字处理电路的隔离;其中射频前端电子学模块实现探测器探头馈入束流信号的幅度调整、频率滤波等功能。AMC 中数字采集板卡实现模拟信号欠采样、利用 FPGA 芯片对四路 ADC 数据进行处理,通过逻辑运算得到束流在水平和垂直方向上的位置信息,通过网络传输至 PC 端,在 PC 端完成数据的读出、存储、分析与显示等功能,该数据将提供给物理人员进行分析^[2-4]。本文主要研究射频前端电子学模块对探测器馈入束流信号处理电路的设计。

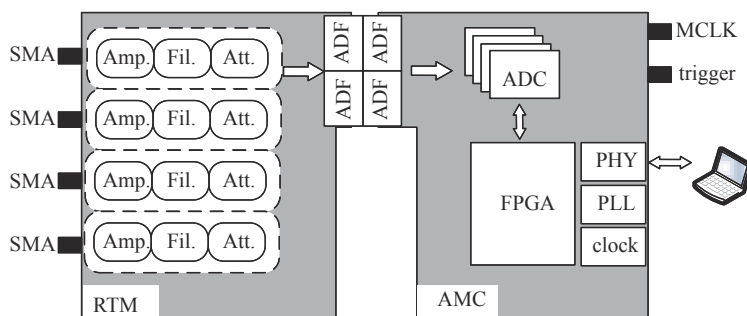


Fig. 1 Architecture of digital BPM electronics system

图 1 数字 BPM 电子学系统结构图

2 射频前端电子学模块设计与仿真

数字 BPM 射频前端电子学调理电路结构如图 2 所示,由四路完全相同的射频信号处理通道构成,结合束流信号频谱以及高精度的电子学需求,将有效带宽内的目标频率信号(499.8 MHz,带宽 ± 10 MHz)提取出来,通过数字步进衰减器和射频放大器调整信号幅度,使 ADC 采集的模拟信号处于合适的幅度范围。功能模块包括幅度调节单元、信号提取单元、相位调节单元、巴伦和 ADF 标准接口等几部分。其中巴伦将单端模拟输入信号转为差分对信号输出,提高四路束流信号的抗干扰能力,经 ADF 标准接口将四路模拟束流信号送至 ADC 芯片完成带通采样;下文对三个信号调理单元以及在 ADS 软件中的级联仿真进行介绍。

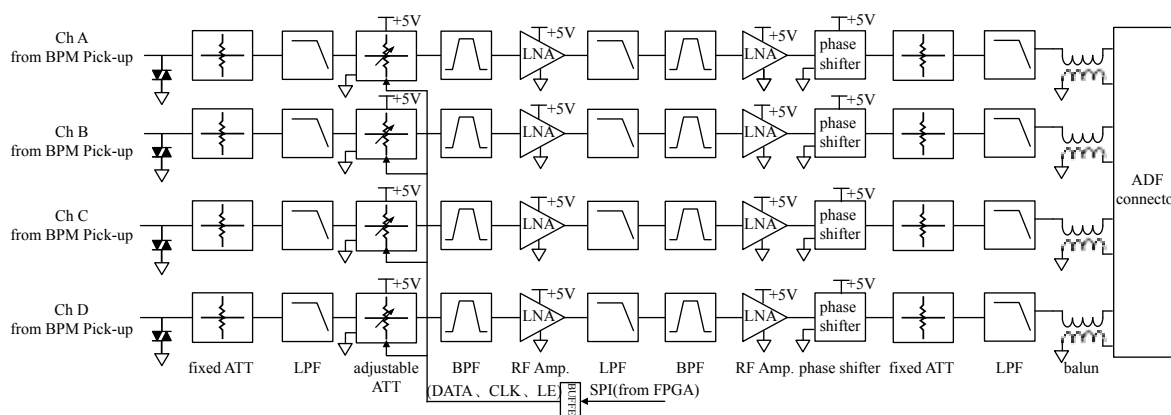


Fig. 2 Architecture of digital BPM RF conditioning circuit

图 2 数字 BPM 射频调理电路结构图

2.1 幅度调节单元

幅度调节单元将不同幅度的模拟束流信号调节至可以被采集电路采集、且满足 ADC 输入量程范围^[5]。经 BPM 探头探测可知束流信号幅值范围为 $-50\sim 0$ dBm,因此该幅度调节单元需满足束流信号大动态范围的调节需求。本设计采用固定增益放大模块与数控可调衰减器模块交替级联,实现射频前端电子学模块束流信号的大动态范围调节^[6]。

固定增益模块由 Π 衰减器和两级级联的射频低噪声功率放大器构成。在前端电子学模块输入端设计了 3 dB 衰减的 Π 衰减器, 实现束流信号功率调节以及输入端阻抗匹配。由于单级低噪声射频功率放大器功率增益较低, 通过合理分配增益, 选用两级级联的低噪声射频功率放大器, 放大器的输出同时作为电源输入端, 提供射频功率放大器的工作电流; 在电源输入端除了放置三个容值不同的电容滤除电源噪声外, 还要放置一个射频扼流圈 (RFchoker), 抑制高频信号进入系统, 降低射频功率放大器交流输出信号从电源端流失的可能性^[7]; 输入输出端采用 AC 耦合, 防止直流分量导致功放输出饱和, 保证其有效动态范围。

在高流强条件下, BPM 探头所感应四路束流信号经射频前端电子学模块放大后会导致 ADC 数据饱和, 设计中选用数字可调衰减器控制大功率束流信号的衰减。通过六级不同衰减量电路串联控制加在束流信号上的衰减量, 衰减器性能指标如表 1 所示, 最小衰减步长 0.5 dB, 能够提供 0~31.5 dB 大范围的衰减, 数控可调衰减器采用三线制的 SPI 总线控制接口。应用中, 通过 FPGA 控制衰减量以调节射频前端电子学模块的整体增益, 提高前端电子学模块通道增益控制的灵活性^[8]。束流信号经固定增益模块和数控可调衰减器模块级联动态变化范围高达 60 dB, 保证电子学系统在束流信号大动态变化范围时准确测量束流位置。

表 1 衰减器性能参数
Table 1 Attenuator performance parameters

| frequency/MHz | voltage/V | step/dB | attenuation /dB | IL/dB | power/dBm |
|---------------|-----------|---------|-----------------|-------|-----------|
| 0.4~4000 | 3 | 0.5 | 31.5 | 1.6 | 28 |

2.2 信号提取单元

BPM 探测器探头感应输出信号频谱范围很宽, 信号频率包括 499.8 MHz 在内的很多高次谐波, 其中 499.8 MHz 频率分量信号幅度较高, 且相对于更高频率的信号容易处理。如图 3 所示, 信号提取单元利用 LC 低通滤波器和 SAW 带通滤波器提取通带在 (499.8 ± 10) MHz 处的频率分量, 用该分量来计算束流的位置信息。本设计使用基于电感、电容级联搭建而成的 7 阶 LC 低通滤波器抑制带内高频谐波成分; 设计采用定制的通带窄、矩形系数好、且抑制比高的中心频率为 500 MHz 的 SAW 带通滤波器, 既能减少束流信号中高频成分, 又能滤除由于射频功放等器件的非线性引入的高频谐波^[9-11]。考虑到输入束流信号成分复杂, 电路中级联射频功率放大器、数控可调衰减器的非线性导致可能产生的射频信号谐波, 以及射频电路的阻抗匹配要求, 设计将低通滤波器和带通滤波器均匀分布在射频链路中, 提取所需频率信号, 滤除通带外噪声信号。

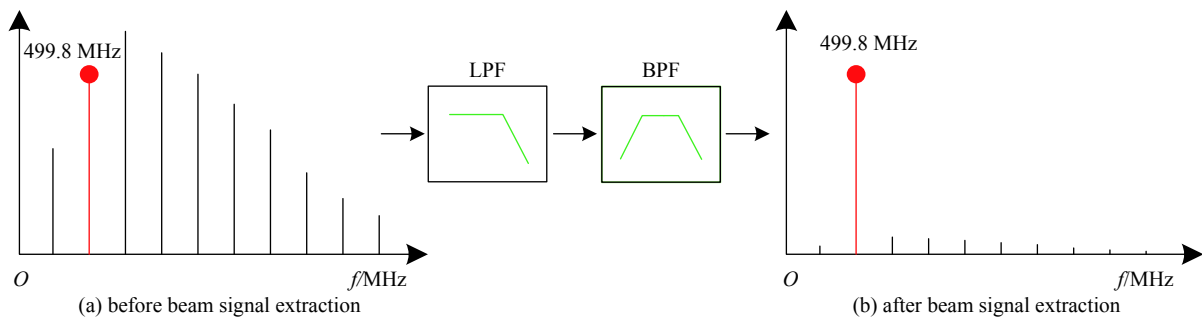


Fig. 3 Diagram of beam signal extraction

图 3 束流信号提取示意图

2.3 相位调节单元

理想状态下, 四路射频前端电子学模块的输入输出响应曲线完全一致。但实际电路中, 同一型号的芯片参数不可能完全一致。BPM 探头所测得四路束流信息经过长距离电缆和电子学通道在进入 ADC 之前存在较大的相位偏差, 从而导致经过 ADC 采集、算法计算后的位置信息不准确。由于数字移相器相位改变不连续, 设计中采用电压可调的模拟移相器调节四路电子学通道间的相位差异。如图 4 所示, 模拟移相器由电压可调的移相器和移相器电压偏置电路两部分组成, 工作电压 5 V, 控制电压 0~5 V, 移相范围 $0^\circ \sim 180^\circ$, 能够满足电子学模块移相范围要求, 偏置电路输入电压恒定, 通过调节滑动电阻器阻值改变电路中电流来改变移相器控制电压, 调节当前通道信号相位^[12]。如图 5 所示, (a) 为移相前四通道存在相位偏移示意图; (b) 为经移相器调节后电子学模块相位一致示意图, 通过调节四通道相位一致保证算法处理得到束流位置的准确性。

2.4 电子学模块级联仿真

根据上文设计方案,在 ADS 中结合各个器件的 S 参数文件对电子学链路进行了仿真分析。图 6 为在 ADS 中搭建的射频电子学链路的仿真模型,图 7 为射频电子学链路的仿真曲线图。图 7 中蓝色线表示经过第一级带通滤波器的 S_{21} 曲线,黑色线表示电子学链路的 S_{21} 曲线,红色线表示衰减 31.5 dB 时电子学链路的 S_{21} 曲线,分析可得链路中多级滤波器级联可以得到更窄的频谱信号,链路输出端信号功率能够满足 ADC 输入要求;对通道内级联的有源器件噪声系数进行计算,其定义如式(1),经计算该电子学链路的噪声系数 $\delta_{NF} \approx 0.51$ dB;且整个频带内的稳定性因子 k 值均大于 1,该链路在频带内稳定。

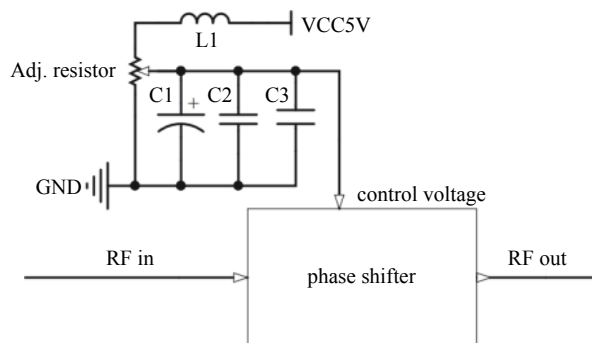


Fig. 4 Diagram of phase shifter circuit
图 4 移相器电路图

$$\delta_{NF} = 10 \lg \left(10^{\frac{\delta_{NF1}}{10}} + \frac{\left(10^{\frac{\delta_{NF2}}{10}} - 1 \right)}{10^{\frac{G_1}{10}}} + \frac{\left(10^{\frac{\delta_{NF3}}{10}} - 1 \right)}{10^{\frac{G_1+G_2}{10}}} + \dots \right) \quad (1)$$

式中: δ_{NF} 为通道的噪声系数; δ_{NF_i} 为第 i 个器件的噪声系数; G_i 为第 i 个器件的增益。

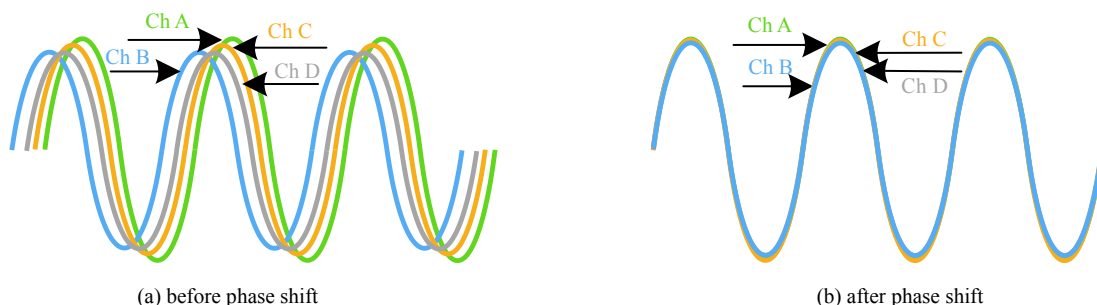


Fig. 5 Schematic diagram of waveforms before and after phase shift

图 5 移相前后波形示意图

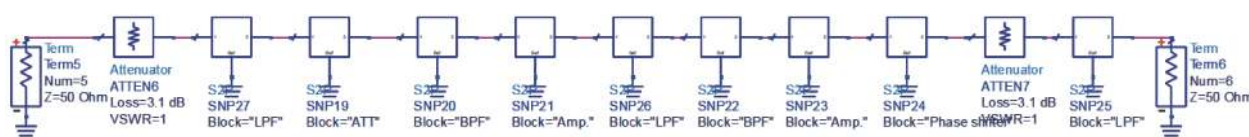


Fig. 6 Simulation model of ADS radio frequency circuit

图 6 ADS 射频电路仿真模型

3 系统测试

3.1 实验室测试

放大滤波性能测试和隔离度性能测试基于矢量网络分析仪来实现;幅相一致性和线性度是基于高精度信号源和四通道示波器来完成,实验室测试平台如图 8 所示。

放大滤波性能测试针对幅度调节单元和信号提取单元性能进行评估。矢量网络分析仪输出频率为 499.8 MHz、功率一定的方波信号模拟束流信号,经功分器分成 4 路信号送至射频前端调理电路,最终通过矢量网络分析仪观察结果。如图 9 所示,以 A 通道 S_{21} 参数测试结果为例,其他三个通道测试结果与 A 通道相当,电子学链路通道增益约为 15.15 dB,在通带范围内信号平坦度较好,并且具有较好的窄带滤波性能,带外抑制能力达 87 dB 以上^[13]。

隔离度性能测试用于衡量当前通道的射频信号泄露到其他通道功率的大小。测试中,矢量网络分析仪输出频率为 499.8 MHz、功率 -30 dBm 的方波信号模拟束流信号输入 A 通道,待测端口接矢量网络分析仪回路,其他为测

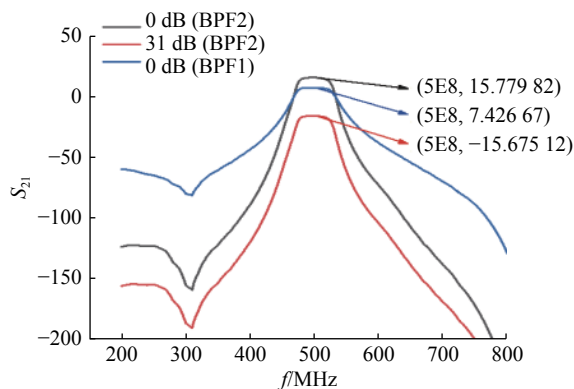


Fig. 7 Simulation results of S parameters of cascade link
图 7 级联链路 S 参数仿真结果

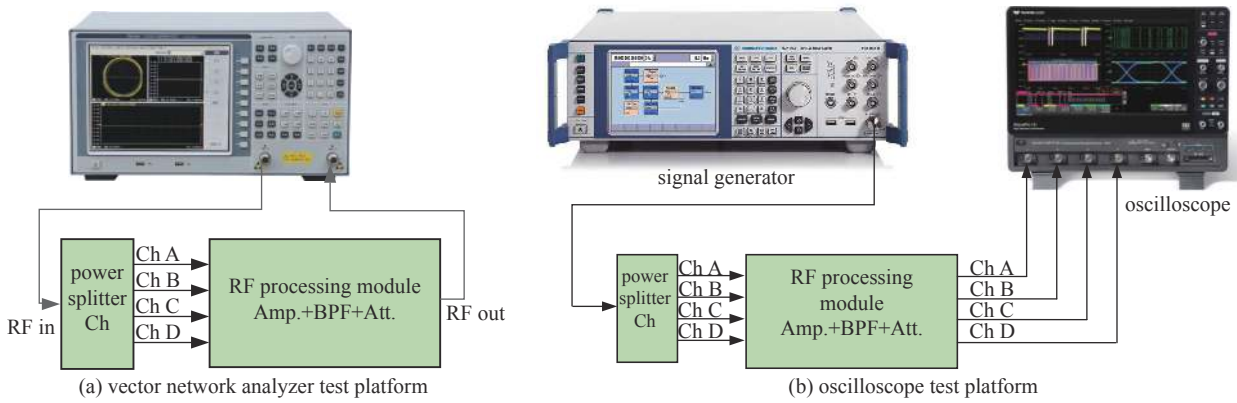


Fig. 8 Laboratory experiment platform

图 8 实验室测试平台

量端口端接 $50\ \Omega$ 负载, 分别测试电子学模块四通道的输出功率, 测试结果如表 2 所示, 可知通道间隔离度大于 $67\ \text{dB}$, 且通道距离越远隔离度越高。

前端电子学模块的幅相一致性将会影响到束流位置分辨的准确性。测试中, 利用高精度信号源产生 $499.8\ \text{MHz}$ 的点频信号经功分器分成 4 路输入到电子学模块的四通道中, 电子学模块四通道输出连接示波器观察射频调理电路的幅相一致性。一般要求各通道相位差在 5° 以内, 幅度差在 10% 以内^[14]。图 10 为幅相一致性测试结果, 相位一致性误差小于 3° , 幅度一致性误差约为 4.98% , 满足一致性要求。

在完成上述各项性能测试后, 为评估数字 BPM 电子学系统整体性能, 在实验室进行了慢采集模式性能测试。信号源产生频率 $499.8\ \text{MHz}$ 、幅度 $-30\ \text{dBm}$ 的点频信号模拟束流

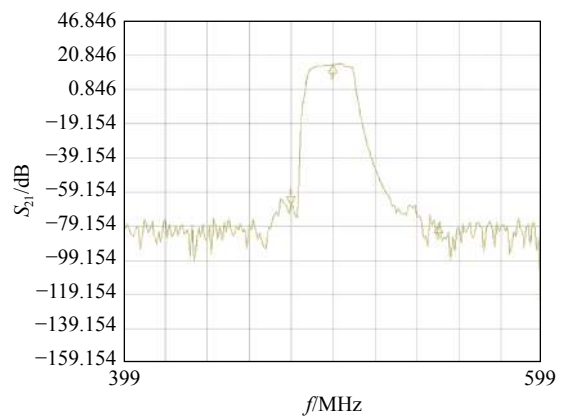


Fig. 9 Amplification and filtering performance testing of electronics module

图 9 电子学模块放大滤波性能测试

表 2 BPM 前端电子学模块隔离度测试

Table 2 Tested isolation data of BPM RF front-end electronics module

| input(Ch A)/dBm | output/dBm | | | |
|-----------------|------------|--------|--------|--------|
| | Ch A | Ch B | Ch C | Ch D |
| -30 | 4.85 | -63.08 | -71.01 | -74.15 |



Fig. 10 Amplitude-phase consistency testing of BPM RF front-end electronics module

图 10 BPM 前端电子学模块幅相一致性测试

信号输入数字 BPM 电子学系统, 在 FPGA 中对实验室采集的约 5000 个采样点测试数据分析得到 x 和 y 方向位置分布直方图, 如图 11 所示, x 方向闭轨位置测量精度约为 $13.46 \mu\text{m}$ 、 y 方向闭轨位置测量精度约为 $14.84 \mu\text{m}$ ^[15]。

3.2 加速器现场测试

利用 BEPC II 直线加速器束流信号对将数字 BPM 电子学系统进行实际束流测试。测试在对撞模式正电子注入、直线束流脉冲流强 90 mA 条件下进行。通过对 BEPC II 采集到的数据分析, 如图 12 所示, 在慢采集模式下,

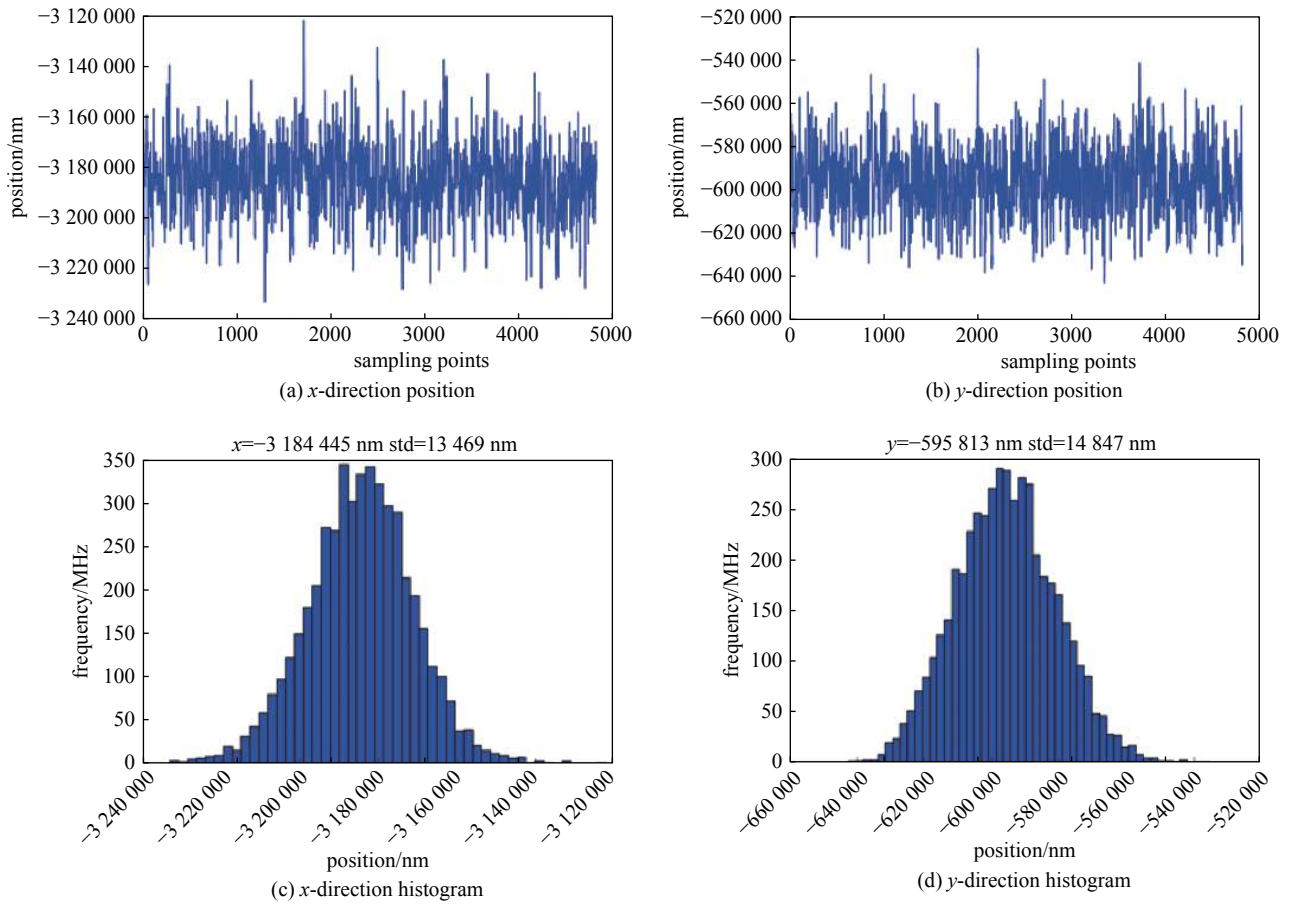


Fig. 11 Closed orbit accuracy test results in the laboratory

图 11 实验室闭轨位置精度测试结果

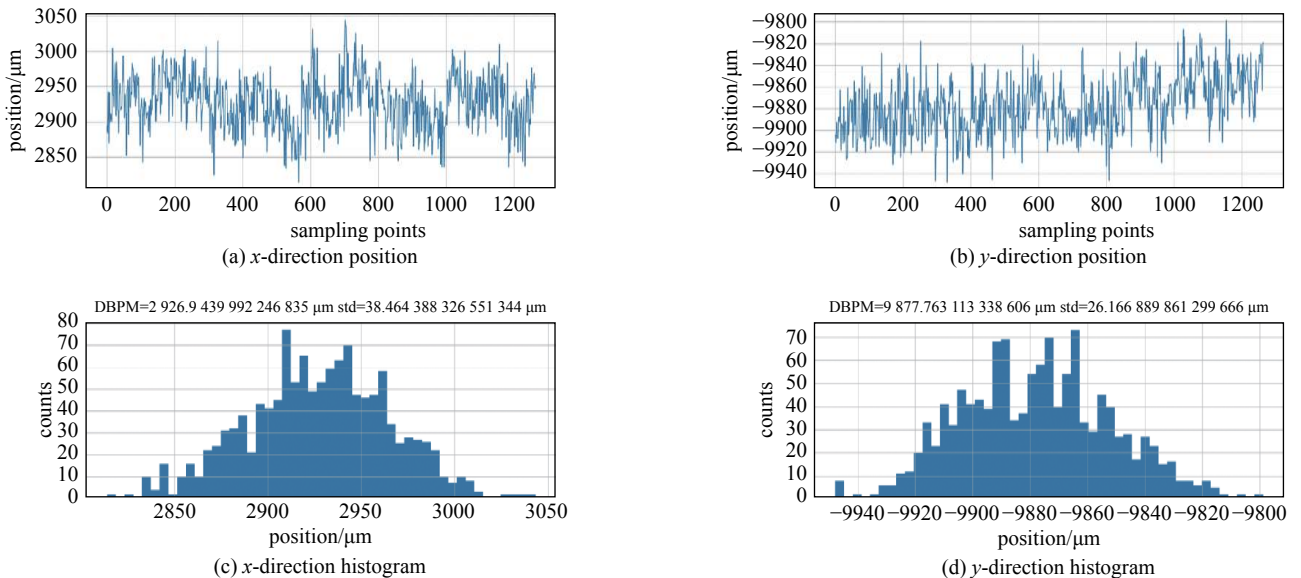


Fig. 12 Closed orbit accuracy test results in the BEPC II linac

图 12 直线加速器闭轨位置测试结果

x 方向闭轨位置测量精度约为 $38.46 \mu\text{m}$, y 方向闭轨位置测量精度约为 $26.16 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

数字 BPM 电子学系统是束流位置测量系统中的关键组成部分,也是束流测量领域的研究热点之一。本文介绍了自研数字 BPM 电子学系统的整体架构,针对 BEPC II 直线加速器束流位置测量的要求,结合束流信号的大动态变化范围和对复杂的频谱成分进行分析,设计并实现了动态范围大、窄带滤波性能好、相位可调节精度高的射频前端电子学模块,介绍了前端电子学模块的仿真结果与实验室各项性能测试结果,完成了实验室束流测量精度测试与直线加速器束流测量精度的在线测试,现已将自研数字 BPM 电子学系统成功应用于 BEPCII 直线加速器用于监测和获取直线加速器束流位置,供物理人员进行分析。

参考文献:

- [1] 杨静,曹建社,杜焱焱,等. BEPC II 直线加速器数字延时触发器的设计与实现[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 074001. (Yang Jing, Cao Jianshe, Du Yaoyao, et al. Design and implementation of digital time-delay triggers for BEPC II linear accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 074001)
- [2] Zhou Hao, Liu Shubin, Zhao Lei, et al. Design of the fully digital beam position monitor for beam position measurement in SSRF[C]//Proc of 9th ICEMI. 2009: 1045-1051.
- [3] Zhao Lei, Liu Shubin, Tang Shaochun, et al. The design and initial testing of the beam phase and energy measurement system for DTL in the Proton Accelerator of CSNS[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(2): 533-538.
- [4] Zhao Lei, Liu Shubin, Li Yusheng, et al. A general purpose test apparatus for high-speed, high resolution analog to digital converters based on IEEE standard[C]//Proc of 7th ICEMI. 2007: 179-184.
- [5] 岳黎冬. 中频信号采集及处理模块研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. (Yue Lidong. Development of IF signal acquisition and processing module[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.)
- [6] Chen Senyu, Xu Hongjie, Zhao Zhentang. Shanghai Synchrotron Radiation Facility[C]//Proceedings of the Particle Accelerator Conference. 1999: 209-211.
- [7] 胡晓芳. ADS 质子直线加速器束流位置和相位测量研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013. (Hu Xiaofang. Research on beam position and phase measurement of ADS Proton Linear Accelerator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013)
- [8] 严哈. 全数字化束流位置测量系统工程样机的设计与制作[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012. (Yan Han. Design and manufacture of engineering prototype of fully digital beam position measurement system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012)
- [9] 杜焱焱. HEPS 中数字 BPM 前端射频调理电路的研制[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2019. (Du Yaoyao. Development of digital BPM front-end RF conditioning circuit in HEPS[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019)
- [10] 周浩. 加速器束流诊断中数字 BPM 系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009. (Zhou Hao. Research on digital BPM system in accelerator beam diagnosis[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009)
- [11] 易星. 加速器束流信号调理及高速采集技术研究[D]. 上海: 中国科学院 上海应用物理研究所, 2012. (Yi Xing. Research on accelerator beam signal conditioning and high-speed acquisition technology[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012)
- [12] 李婷. 手持终端智能天线的设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019. (Li Ting. Design of smart antenna for handheld terminal[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019)
- [13] 严哈, 赵雷, 刘树彬, 等. 数字 BPM 系统中模拟调理电路的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(9): 1048-1052. (Yan Han, Zhao Lei, Liu Shubin, et al. Research on analog conditioning circuits in digital BPM systems[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2012, 32(9): 1048-1052)
- [14] Du Yaoyao, Yang Jing, Wang Lin, et al. Design of RF front end of digital BPM for BEPCII[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2019, 3(3): 38.
- [15] 随艳峰, 杜焱焱, 叶强, 等. 基于 BEPC II 数字束流位置测量系统电子学系统的设计与实现[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(1): 172-178. (Sui Yanfeng, Du Yayao, Ye Qiang, et al. Based on BEPC II digital beam position measurement system of electronics system design and implementation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(1): 172-178)