

# 上海光源数字化束流位置信号处理器测试平台研制

陈方舟<sup>1,2</sup> 赖龙伟<sup>1</sup> 阎映炳<sup>1</sup> 冷用斌<sup>1</sup>

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 数字化束流位置信号处理器(Digital Beam Position Monitor Processor, DBPM)是上海光源自主研发作为束流位置监测(Beam Position Monitor, BPM)的主要设备。针对 DBPM 电子学处理器产品化测试需求开发了一套基于 MATLAB 和程控技术的自动化测试平台,用于处理器批量测试验收和性能评估。平台使用 Agilent MXG 信号源和一分四功分器模拟 4 路真实探头信号,经过处理器采集处理后被上位机接收。测试仪器的设置和实验数据的获取,整个系统是基于客户端和服务端架构实现的。采用物理实验与工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)的通道访问 LabCA 接口实现数据的实时采集。目前该测试平台已经成功应用于大连自由电子激光装置和上海软 X 射线自由电子激光装置的 DBPM 处理器验收测试,处理器幅频响应曲线,不同衰减下模数变换器(Analog to Digital Converter, ADC)噪声水平测试、衰减步长一致性、通道间串扰及信噪比测试结果均达到设计指标。

**关键词** MATLAB, 数字化束流位置信号处理器, 物理实验与工业控制系统, 程控技术, 上海光源

中图分类号 TL506.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.110102

## Development of a test platform for digital beam position monitor processor at SSRF

CHEN Fangzhou<sup>1,2</sup> LAI Longwei<sup>1</sup> YAN Yingbing<sup>1</sup> LENG Yongbin<sup>1</sup>

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

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

**Abstract Background:** To satisfy the requirements of digital beam position monitor in Dalian coherent light source (DCLS) and Shanghai X-ray free-electron laser (SXFEL), over 200 digital beam position monitor processors (DBPM) have been developed at Shanghai synchrotron radiation facility (SSRF). **Purpose:** This study aims to develop an automatic test platform for the device acceptance test and performance evaluation of these DBPMs. **Methods:** Based on MATLAB and standard commands for programmable instruments (SCPI), a signal is produced by the Agilent signal source MXG N5181A to simulate the real beam signal. Experimental physics and industrial control system (EPICS) is adopted as the network control system to integrate instruments test commands and experimental data are transferred via a router. EPICS LabCA is used to realize the data acquisition channel access interface. **Results & Conclusion:** The platform has been successfully used to test the noise level, crosstalk between channels, amplitude frequency response and signal noise ratio (SNR) of all DBPMs at both DCLS and SXFEL automatically.

**Key words** MATLAB, DBPM, EPICS, SCPI, SSRF

国家自然科学基金(No.11375255、No.11305253)资助

第一作者: 陈方舟, 女, 1994 年出生, 2014 年毕业于中国科学技术大学, 现为博士研究生, 研究领域为信号与信息处理

通信作者: 赖龙伟, E-mail: lailongwei@sinap.ac.cn

收稿日期: 2017-06-30, 修回日期: 2017-09-18

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11375255, No.11305253)

First author: CHEN Fangzhou, female, born in 1994, graduated from University of Science and Technology of China in 2014, doctoral student, focusing on signal and information processing

Corresponding author: LAI Longwei, E-mail: lailongwei@sinap.ac.cn

Received date: 2017-06-30, accepted date: 2017-09-18

束流位置是加速器的重要参数之一,束流位置测量(Beam Position Monitor, BPM)对加速器的状态判断和性能评估具有重要意义。高能束流运行过程中会产生纯横电磁场(Transverse Electric and Magnetic Field, TEM),当束流偏离真空室中心则耦合出的束流的电磁场将被调制,由此可得到束流位置信息<sup>[1]</sup>。束流位置测量系统是粒子加速器的重要诊断设备,它不仅能检测束流在加速器真空轨道中的运行位置,还能导出加速器运行过程中的束流频谱、工作点、色散函数、横向阻尼时间、 $\beta$  振荡相差等重要参数。随着各种类型加速器发展,BPM 信号处理器得到了快速的发展,经历了从模拟到数字化、智能化和一体化的三个主要阶段,分辨率逐步提高,逐圈分辨率达到亚微米水平<sup>[1-4]</sup>。

数字束流位置信号处理器(Digital Beam Position Monitor Processor, DBPM)是近年来加速器束流诊断领域中发展起来的最新技术之一。由于它应用了高速数字化技术和信号处理技术,简化了整套电子学架构,使加速器束流诊断系统性能大大提高<sup>[3-6]</sup>。

上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)束测组自主研发的基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)和精简指令集机器(Advanced RISC Machine, ARM)的一体化 DBPM 数字信号处理器,是国内首台研制成功的 BPM 信号处理器,其与国外同类产品的性能指标持平<sup>[6]</sup>,现阶段已实现产品化量产,并承接了大连化学物理研究所的大连自由电子激光装置和中国科学院上海应用物理研究所的上海光源自由电子激光装置的束流位置测量工程<sup>[5]</sup>。在生产每批次处理器正式投入使用前,需要对其各项性能指标进行电子学测试验收,从而保证处理器的加工可靠和性能稳定,为此要搭建一个自动高效的测试平台。

图 1 为基于软件无线电架构的 DBPM 处理器的原理框图。探头采集到的束流位置信号在射频信号调理模块完成信号调理,处理后的信号在模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)模块完成数字

化,数字化采集后的信号在基于 FPGA 的数字处理器中通过信号处理算法完成信号处理,整个数据采集系统由集成了物理实验与工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)软件的 ARM-Linux 进行系统控制<sup>[6-8]</sup>。

## 1 测试平台需求分析

DBPM 数字信号处理器的信号调理及数据采集由射频信号调理模块和模数转换模块组成。射频(Radio Frequency, RF)信号调理模块对中心频率 500 MHz、带宽约为 10 MHz 的信号完成滤波和增益控制;基于放大器和数控衰减器组成的增益控制电路为处理器提供了高达 32 dB 的动态范围;基于声表面波和离散元器件的滤波器完成抗混叠滤波<sup>[6-9]</sup>。为检测 DBPM 处理器电子学性能是否满足设计指标,本测试平台要求实现 RF 信号调理模块与 ADC 模块的基本测试功能。

### 1.1 幅频响应测试

DBPM 电子学工作在带通欠采样的模式下,SSRF 加速器 RF 频率是为 499.654 MHz,依此设计的 DBPM 处理器电子学理想的工作频率是 500 MHz,理想的通带区间在 490-510 MHz。测试电子学的通带行为将测试区间定在 480-520 MHz。选择合适的步长需要在实验设计阶段的调试过程中综合考虑测试数据采集的循环周期及循环次数。最后固定好信号源的输出幅度,按照选择的步长和频率区间扫频并将获取到的数据做功率谱密度分析,从而得到射频电路模块的频谱响应曲线。

### 1.2 线性度测试

ADC 的信噪比与输入信号幅度有关。因此,在 RF 信号调理模块中使用由放大器和衰减器组成的增益控制电路调节信号幅值。对增益控制电路的测试包括了各通道增益步长一致性和噪声衰减一致性测试。

### 1.3 ADC 信噪比测试

模数转换模块完成了信号从模拟量到数字量的转换,ADC 转换精度直接影响处理器性能,其中 ADC 的信噪比更直接关系到处理器的分辨率。在测试过程中使用信号发生器产生让 ADC 临界饱和幅度的输入信号评估了 ADC 模块的信噪比能否满足 BPM 信号处理器的需求;同时为了充分评估在不同束流状态下的信噪比表现,通过改变信号源输出功

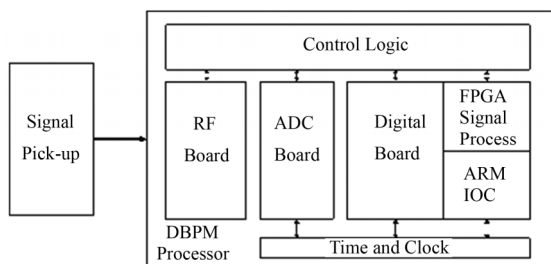


图 1 SSRF DBPM 原理框图

Fig.1 Functional block diagram of DBPM at SSRF.

率的大小以及通过数控衰减器调节增益控制，对中心频率 500 MHz 频点做了全面测试。

## 2 系统测试平台设计和实现

该平台主要由射频信号源、功分器、交换机、待测处理器及上位机构成，利用网络接口以及 TCP/IP 协议实现各个单元之间的通信。用射频信号源、功分器构成的信号网络模拟储存环束流信号，基于 Linux 平台的 EPICS IOC 作为 DBPM 参数设置和数据采集工具，同样在基于 Linux 操作系统的上位机中运行 MATLAB 测试脚本进行 DBPM 电子学性能的测试。

DBPM 处理器上集成了上海光源束测组自主开发的基于 EPICS 的在线数据分析软件包。EPICS soft IOC 实现 DBPM 电子学实时数据访问和 RF 前端功能模块设置<sup>[9-11]</sup>。

可编程仪器的标准命令(Standard Commands of Programmable Instruments, SCPI)是测量仪器程控命令的重要标准，定义控制可编程测试测量仪器的标准语法和命令。该标准没有定义物理接口，综合本测试平台整体结构的紧凑性设计原则，采用基于 TCP/IP 协议的程控技术操控信号源。SCPI 与编程手段和程序语言无关，MATLAB 可以完成 SCPI 命令的传递。

由射频信号源和微波器件搭建信号发生网络产生模拟 BPM 探头的 4 路输出信号，采用 SSRF 束测组自主开发的 EPICS IOC 负责 DBPM 内部参数设置和数据采集，上位机在 MATLAB 中通过 TCP/IP 协议发送 SCPI 命令，利用程控技术完成主机对测试仪器信号源的配置及主测试程序开发，通过交换机和 TCP/IP 协议实现仪器间的互联通信。

### 2.1 测试平台的软件架构

EPICS 通道访问客户端和服务端运行在不同的平台上，测试程序调用由 Stanford 开发的基于 MATLAB 的 LabCA library 通道访问客户端函数用于客户端和服务端的相互访问。图 2 是测试平台

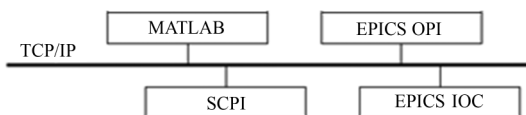


图 2 软件架构示意图  
Fig.2 Software architecture of the platform.

的软件架构示意图。DBPM 通过交换机与上位机相连，上位机通过 EPICS 通道访问完成对 DBPM 处理器参数的设置，同时处理器采集到的实时数据通过网络传输给上位机处理。另外，基于网络的通信模式使测试系统易于移植到其他类似处理器的验收测试中。

### 2.2 测试平台硬件结构

测试平台的具体搭建如图 3 所示，基于 Linux 操作系统的上位机搭载 EPICS IOC 和 MATLAB；待测 DBPM 处理器上运行面向测试开发的 EPICS OPI，处理器基于 ARM 架构并且搭载了 Linux 嵌入式操作系统；测试信号是由 Agilent MXG N5181A 射频信号发生器产生 RF 频率附近的正弦信号；信号发生网络由 Mini-Circuits ZFSC-4-1-S 功分器和电缆组成，信号经过该网络得到 4 路模拟 BPM 探头 pick up 信号；MERCURY 8 口 10/100 M 自适应以太网交换机连接各仪器形成小型局域网。

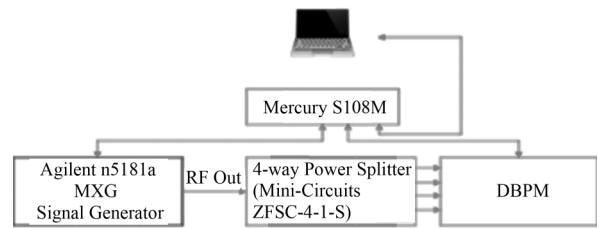


图 3 DBPM 测试平台结构示意图  
Fig.3 Block diagram of DBPM test platform.

### 2.3 测试程序流程图

图 4 是测试的软件流程示意图，主要包括上位机和信号源的自检和初始化、设置测试参数及执行测试、纪录测试结果并生成测试报告。系统重置 4 个模块。

自动测试主程序：包含各测试子项目、测试模型、测试数据及波形保存路径。

批处理脚本文件：根据自动测试主程序所设置的一系列参数生成可以自动测试的脚本文件。

自动生成测试报告：将采集到的实验数据及通过 MATLAB 进行数据分析并将处理后的波形整合在实验报告中。

测试功能模块主要包括：幅频响应测试，通过程控技术使信号源输出频率范围为 480-520 MHz，步长为 0.5 MHz 的信号馈入 DBPM 处理器中，根据处理器读取值绘制幅频响应曲线。

ADC 噪声水平的测试：通过断开 DBPM 处理器与信号源之间的连接，设置 DBPM 处理器不同增益下处理器读取值来评估噪声水平。

通道串扰测试：通过逐一接通 A、B、C、D 信号，获取在单一通道信号输入状态下，4 路通道读取值来评估通道间串扰。

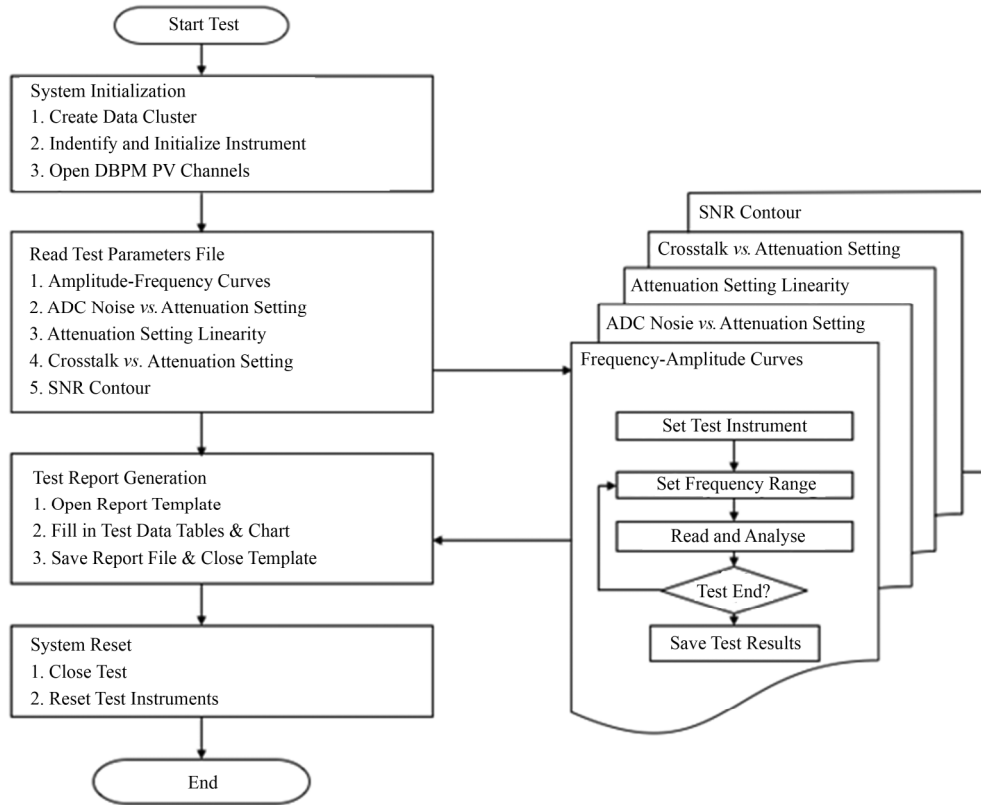


图 4 DBPM 测试系统软件流程图  
Fig.4 Software flow pattern of DBPM.

信噪比测试 控制信号源产生不同幅度的信号，在不同增益下的读数，参考 ADC 噪声水平模块的测试结果，信噪比计算公式：

$$\text{SNR} = \frac{R_{\text{ADC}} - R_{\text{noise}}}{R_{\text{noise}}} \quad (1)$$

式中： $R_{\text{ADC}}$  是信号源输入 DBPM 处理器读取值； $R_{\text{noise}}$  是 ADC 噪声水平测试时读取值。根据式(1)可计算得到不同信号强度及不同增益下 DBPM 处理器信噪比热图。

### 3 实验室测试结果

测试平台已完成大连相干光源(Dalian Coherent Light Source, DCLS)工程的 20 台 DBPM 处理器的验收测试，完成每台 DBPM 的噪声水平、信号串扰、幅频响应、信噪比等测试仅需 20 min，比人工手动测试节约一半的时间。测试平台如图 5 所示，包含信号源、上位机、交换机和待测 DBPM 处理器。

自动测试程序测试并保存了 20 台 DBPM 的原

始测试数据，同时对测试结果数据进行全面分析并保存测试报告。图 6 是自动生成的 DCLS 工程中编号为 UD-BI:CBPM-DA-6 的 DBPM 处理器测试报告，包含了噪声水平、信号串扰、幅频响应测试、信噪比热图等重要信息。由图 6 可以看出，DBPM 电子学噪声水平和信号串扰都处在较低的水准，带通滤波器通带性能达到预期状态，信噪比可以满足有效位 12 位的要求。



图 5 硬件测试现场照片  
Fig.5 Photograph of the hardware test platform.

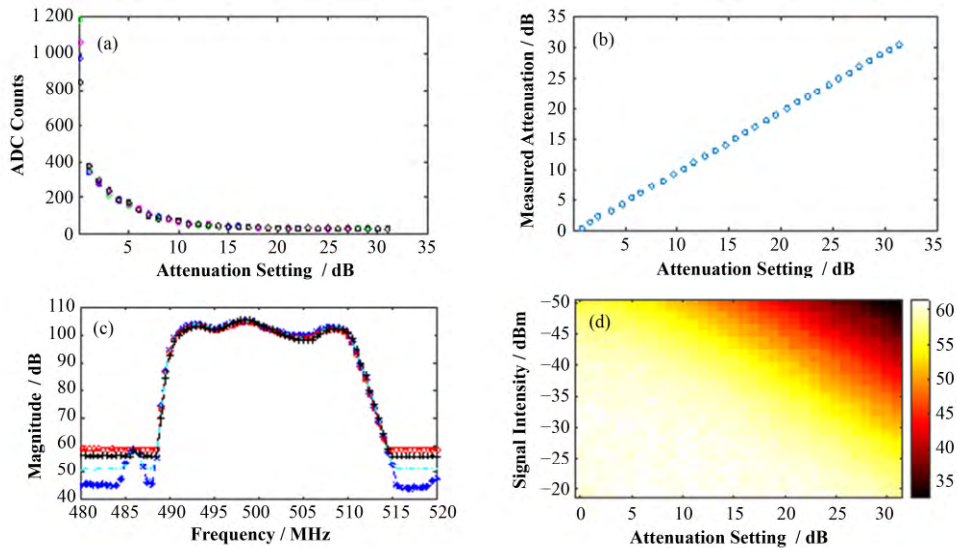


图 6 UD-BI:CBPM-DA-6 DBPM 性能测试结果  
 (a) 不同衰减下噪声水平测试, (b) 增益线性一致性测试, (c) 幅频响应测试, (d) 信噪比热图测试  
**Fig.6** Performance test results of UD-BI:CBPM-DA-6 DBPM.  
 (a) Noise levels under different attenuation tests, (b) Gain linear consistency test, (c) Amplitude response test, (d) Signal to noise ratio thermal graph test

图 7(a)是 20 台机器的频谱响应汇总,频谱特征显示在 RF 频点附近滤波器的通带表现良好。通过图像发现 20 台测试机器在 505 MHz 附近都出现频谱表现不稳定的特性,可以排除仪器设备生产加工过程部分器件虚焊等缺陷造成的影响,分析可能原因是在 DBPM 设计过程中元器件的选型或电路板设计方面引入的误差,对以后的器件选择和电路优化提供改良方向。

图 7(b)是 20 台 DBPM 电子学信噪比性能测试中得到的最大值和最小值。可知 DBPM 信噪比表现良好,考虑到模拟输入信号是由高精度高性能的信号源产生的洁净信号,同时信号进入 DBPM 后不经过放大衰减模块不会引入新的噪声,最终信噪比表现可以高达 65 dB;而当输入信号幅值小,需要经过放大衰减模块就会引入新噪声的话,信噪比表现会下降到 33 dB 左右。

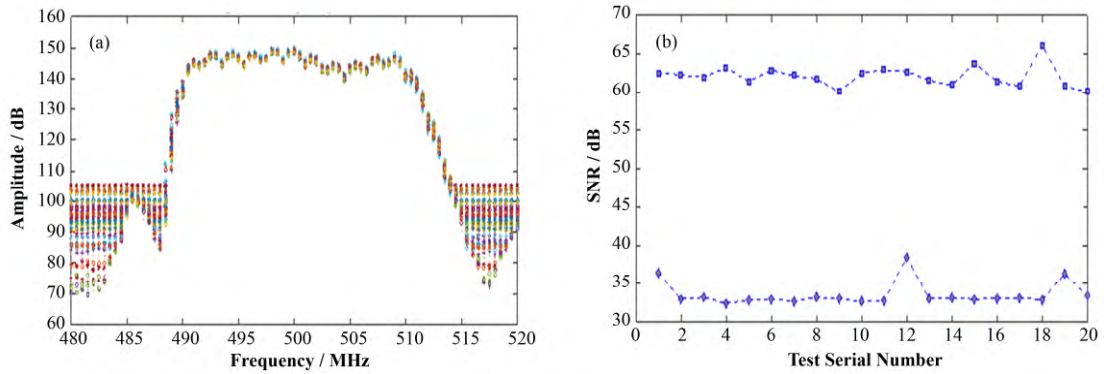


图 7 20 台 DBPM 电子学 RF 模块频谱响应曲线(a)和 ADC 模块信噪比范围(b)  
**Fig.7** Spectral response curve (a) and SNR range of ADC module (b) of 20 DBPM RF modules.

#### 4 结语

本文提出的测试平台采用通用 PC、Agilent 公司 MXG 信号源和交换机共同构建实现。本测试平台基于 MATLAB 和程控技术,PC 端的 MATLAB 负责整个系统的控制和信号的后处理和分析。引入 EPICS IOC 和 MATLAB LabCA library 进行数据采

集和设备控制,规避了针对待测件硬件接口的驱动程序开发,从而使系统具有了一定的重用性,只要采用相应的 IOC 和设备支持模块,本测试平台可顺利移植到其他支持程控技术的仪器测试。

测试结果表明,DBPM 处理器的主要性能均达到预期设计指标,可用于处理器批量测试,为及早发现处理器可能存在的问题提供了很好的工具。同

时测试发现的不足也为后续 DBPM 处理器的硬件设计方案优化、软件算法优化和相关功能模块的进一步完善提供了方向。

#### 参考文献

- 冷用斌, 周伟民, 袁任贤, 等. 上海光源储存环束流位置监测系统[J]. 核技术, 2010, 33(6): 401-404.  
LENG Yongbin, ZHOU Weimin, YUAN Renxian, *et al.* Beam position monitor system for SSRF storage ring[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(6): 401-404.
- 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): 326-330.  
LENG Yongbin, YI Xing, LAI Longwei, *et al.* The development of a new digital BPM processor[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(5): 326-330.
- Lai L W, Leng Y B, Yi X, *et al.* DBPM signal processing with field programmable gate arrays[J]. Nuclear Science and Techniques, 2011, 22(3): 129-133.
- Yi X, Leng Y B, Lai L W, *et al.* RF front-end for digital beam position monitor signal processor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2011, 22(2): 65-69.
- Chen J, Leng Y B, Yu L Y, *et al.* Beam test results of high Q CBPM prototype for SXFEL[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, 28(4): 51. DOI: 10.1007/s41365-017-0195-x.
- 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.
- 赖龙伟. FPGA 在数字 BPM 信号处理器中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.  
LAI Longwei. Application of FPGA on DBPM signal processing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 易星. 加速器束流信号调理及高速采集技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.  
YI Xing. Research of signal conditioning and high speed data acquisition techniques for particle accelerator beam diagnostics[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 赖龙伟, 冷用斌, 阎映炳, 等. 数字 BPM 信号处理器的研制进展[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(9): 607-610.  
LAI Longwei, LENG Yongbin, YAN Yingbing, *et al.* Progress of digital BPM signal processor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(9): 607-610.
- 阎映炳, 冷用斌, 杨嵩. EPICS 在线数据分析软件包研制及应用[J]. 核技术, 2008, 31(3): 170-173.  
YAN Yingbing, LENG Yongbin, YANG Song. Development and experiment of EPICS online data analysis software package[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(3): 170-173.
- 杨嵩, 冷用斌, 阎映炳. 基于 EPICS 及虚拟仪器技术的 Libera 测试系统研制[J]. 核技术, 2008, 31(6): 410-414.  
YANG Song, LENG Yongbin, YAN Yingbing. R&D of a Libera test system based on virtual instrument and EPICS[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(6): 410-414.