

基于 EPICS 的 CSRe 束流诊断控制系统升级*

李 敏¹, 聂勇敢¹, 李生鹏², 李维龙^{1,3}, 董金梅¹, 陈玉聪¹, 赵铁城¹, 毛瑞士¹,
徐治国¹, 康新才¹, 冯永春^{1,3}, 赵祖龙^{1,3}, 王延谋¹, 马维年¹, 尹 炎¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 兰州科近泰基新技术有限责任公司, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 兰州重离子加速器(HIRFL)冷却存储环的实验环(CSRe)提供高品质的束流用于高精度的质量测量、原子物理等实验研究,实现束流参数的准确测量是进行物理实验的前提保障。目前,CSRe 加速器控制系统已升级为 EPICS 架构。介绍了基于 EPICS 的束流诊断控制系统现状,并利用升级后的控制系统测量了束流相关参数。其中,束流位置系统能够测量注入束流的逐圈位置信息,测量结果发现束流在注入过程中存在一定程度的震荡,影响注入效率。流强测量系统通过高分辨的数据采集卡实现对 DCCT 信号的精确测量,同时增加了 D 事例触发功能。升级后的控制系统,可以实现束流参数的测量,并集成于加速器控制系统的 EPICS CSS 界面。

关键词: 冷却存储环; 束流位置探测器; 逐圈测量; DCCT

中图分类号: TL507

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB201931.190144

Upgrade of CSRe beam diagnostic control system based on EPICS

Li Min¹, Nie Yonggan¹, Li Shengpeng², Li Weilong^{1,3}, Dong Jinmei¹, Chen Yucong¹, Zhao Tiecheng¹,
Mao Ruishi¹, Xu Zhiguo¹, Kang Xincan¹, Feng Yongchun^{1,3}, Zhao Zulong^{1,3},
Wang Yanmou¹, Ma Weinian¹, Yin Yan¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Kejin Taiji Corporation, Ltd, Lanzhou 730000, China;

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

Abstract: The experimental Cooling Storage Ring (CSRe) of the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL) provides high-quality beam for high-precision mass measurement, atomic physics and other experimental studies. Consequently, accurate measurement of beam parameters is the prerequisite for physical experiments. At present, the control system of CSRe has been upgraded to the EPICS architecture. This paper introduces the current status of the beam diagnostics control system based on EPICS which is affiliated with the accelerator control system. Moreover, some of the beam parameters are measured and analyzed by the upgraded beam diagnostics control system. According to the test results with beam at CSRe, the beam position control system can measure the turn-by-turn position of the injected beam. Furthermore, the calculated turn-by-turn position results show that there is a certain degree of oscillation during the injection process, which affects the injection efficiency directly. The beam current measurement system can achieve precise measurement with DCCT by upgrading a high-resolution data acquisition card, in addition, the D event trigger has been integrated into the beam current control system for receiving the trigger and synchronized information from the virtual accelerator. The upgraded control system is running stably and can measure the beam parameters since the upgrade in 2018 and has been integrated into the graphical user interface (GUI) of the accelerator control system.

Key words: experimental Cooling Storage Ring; beam position monitor; turn-by-turn measurement; DCCT

PACS: 29.20.-c; 29.20.D-; 29.20.db

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)CSRe 上安装多种束流诊断设备以实现束流参数的测量,并协助 CSRe 充分发挥高质量谱仪功能^[1-2]。上述探测器的控制则是基于分布式、独立、远程界面的方式实现。目前 HIRFL-CSR 的控制系统基于 EPICS 进行了升级改造,作为加速器控制系统子系统的束流诊断系统,必然也需要升级为

* 收稿日期:2019-05-05; 修订日期:2019-09-11

基金项目:国家实验室 HIRFL 运行课项目(Y9HIRLL100)

作者简介:李 敏(1983—),女,博士,工程师,从事探测器测控技术及应用;limin@impcas.ac.cn。

通信作者:毛瑞士(1979—),男,博士,正高级工程师,从事束流诊断探测器技术;maorsh@impcas.ac.cn。

级之前的每种类型探测器的控制系统需维护和使用一个独立界面；针对不同类型的探测器，其多样化的通信接口使得开发每种类型的上位机界面时需要显示具体的通信连接方式，加速器调束和运行时没有统一的束诊控制界面，更多的时候使用远程界面或者 VPN 登录方式实现具体控制。

2 束流诊断控制系统升级方案分析

HIRFL-CSR 束流诊断控制系统硬件大多采用 NI 产品，因此采用基于 LabVIEW 软件实现各种探测器的控制和测量功能。LabVIEW 语言是一种带有扩展库函数的通用程序开发系统，提供许多库函数，包括数据采集、GPIB 和串口仪器控制，数据显示、分析和存储等。开发者可以利用 LabVIEW 提供的库函数，轻松完成设备驱动程序的开发^[6]。利用 LabVIEW 开发的软件扩展名为 .vi。

目前，LabVIEW 通过使用 LabVIEW 共享变量引擎 (SVE)^[7] 和 LabVIEW EPICS I/O 服务器^[8] 实现 EPICS PV 变量的发布和读取，其具体实现流程如图 3^[9] 所示。其中，SVE 运行在 NI 自主研发的发布订阅协议 (NI-PSP) 上，支持安装了 NI 软件的 PC 和实时操作系统。

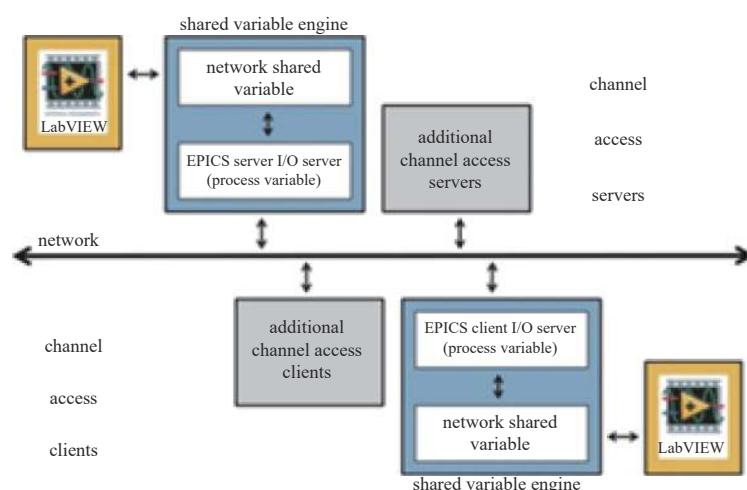


Fig. 3 Data exchange interface between LabVIEW and EPICS

图 3 LabVIEW 与 EPICS 网络之间的数据交互接口

- (1) LabVIEW VIs (EPICS 客户端或 EPICS 服务器) 读取和写入网络发布的共享变量；
- (2) 网络发布的共享变量被绑定到 EPICS PV；
- (3) EPICS 客户端 I/O 服务器监测 PVs 的更新；
- (4) EPICS Server I/O 服务器使用 Channel Access 协议将 PVs 发布到 EPICS 网络。

基于上述过程，利用 LabVIEW EPICS 接口实现 PV 变量发布的底层数据交互复杂性高，现场测试利用 LabVIEW EPICS 接口发布的 PVs，其稳定性不高；而且 LabVIEW EPICS 客户端 I/O 服务器仅支持 Windows 操作系统^[10]；鉴于利用该软件包使用复杂度高、可能导致的不稳定性和使用不广泛性等原因，HIRFL 束诊控制系统不采用该方案实现 EPICS 的升级。

2.1 CA Lab

在 LabVIEW 中实现 EPICS 通信的方法有很多种，CSRe 束流诊断控制系统的升级是通过德国柏林赫尔姆霍兹中心 (HZB) 提供的 CA Lab 实现 LabVIEW 中的变量同 Windows 平台上 EPICS IOC 中的 PV 对应起来^[11]。

CA Lab 是一个用户友好、轻量级和高性能 LabVIEW 和 EPICS 之间的接口工具包，两者之间的接口关系如图 4 所示。该接口使用经过验证的 EPICS BASE 库 (V3.14.12)，CA Lab 接口库和多态 VI 实现对 EPICS PV 的访问，其主要特点描述如下^[11]：

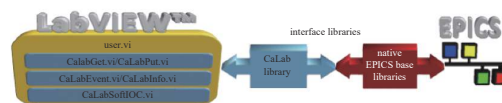


Fig. 4 Schema of CA Lab interface

图 4 CA Lab 与 EPICS 接口的架构图

(1) 基于 EPICS base 包，对 EPICS 的所有数据类型，CA Lab 都能有效支持。目前 HIRFL-CSR 控制系统基于 EPICS BASE 3.14 版本，选用的 CA Lab 接口版本与加速器控制系统的 EPICS Base 版本一致。

(2) 最新版本的 CA Lab 在创建、读取和编写 EPICS PV 变量时非常简单，该接口可以轻松实现 EPICS 变量的用

户事件。根据已经实现的基于 CA Lab 开发的前端控制器程序的开发经验可知,利用该方式可以利用 CA Lab 简单、快速实现流诊断探测器控制系统的 PV 变量发布。

(3) EPICS 时间戳、状态等可选 PV 字段(属性)绑定到数据集中,可以避免不一致的数据集,容易创建 VI 的可执行文件。

(4) CA Lab 适用于从 7.0 到 2016(32 位/64 位)的所有 LabVIEW 版本(Windows 和 Linux 操作系统)。此接口仅需要 LabVIEW 即可执行,不必创建任何 LabVIEW 项目,也不必使用外部服务。升级后的 CSRe 束诊前端控制系统硬件设备存在 Windows 和 Linux 并存的现状,CA Lab 支持两种操作系统的特点满足此次软件升级的应用需求。软件升级过程中,在 Windows 中,使用 CaLabSoftIOC.vi 创建新的 EPICS 变量并启动这些变量。Linux 系统中,使用标准 soft IOC 创建 PV,从而实现不同操作系统下的基于 LabVIEW 和 CA lab 插件的 EPICS PV 发布。

目前 HIRFL 流诊断控制系统除了使用 NIPXI、PXIe、USB 等产品外,HIRFL 流诊断升级过程中还选用 NI CompactRIO (cRIO)实现前端探测器的数据采集、运动控制等功能。其控制器采用 NI Linux Real-Time^[12-13]操作系统,但与 CA Lab 支持的 Ubuntu 操作系统不同,该系统下不能直接使用 CA Lab 接口函数。为了解决上述问题,下载 NI 提供的 C/C++ 交叉编译器,通过交叉编译的方法实现 CA Lab 在 NI Linux Real-Time 上的应用。

(5) 低网络负载的数据监测和缓存。

(6) CA Lab 是开源的。

2.2 ZeroMQ (大数据传输)^[14]

束流诊断数据采集及控制系统的一个主要特点就是探测器采样数据的实时高速传输,目前在武威重离子加速器上实现的基于 LabVIEW 开发的 TCP 协议可以实现数据的无丢失传输,经武威现场测试后,封装后的 TCP 数据传输包不能实时传输到上位机界面,网络拥塞时甚至有数 s 的延时,因此影响数据的实时更新。对比近年来“Message Queue”的主流产品(MSMQ, ActiveMQ, RabbitMQ, ZeroMQ)^[15],只有 ZeroMQ 是以库的形式存在,由应用程序加载、运行即可。其他 3 款产品都是一个单独服务或者进程,需要单独安装和运行,且对环境有一定依赖。

ZeroMQ 屏蔽了点对点连接时需要显式地建立连接、销毁连接、选择协议(TCP/UDP)和处理错误等技术细节,使网络编程更为简单。根据加速器应用需求特点,束诊采用 Publisher-Subscriber 通信模式发布测量的束流信息。需要大数据传输的探测器的前端控制系统以 Publisher 的形式在网络发布测量数据,用户以 Subscriber 的身份通过 Publisher 的 IP 地址和端口号获取束流采样数据,以供实时处理、显示或者存储以供离线数据处理和分析,实现一对多的工作协议模式。且该工具包支持 LabVIEW、Python、C++ 等多种开发语言,以满足熟悉不同软件语言用户的连接需求。

基于上述 ZeroMQ 的特点,国外众多加速器选用其作为数据传输、分布式数据计算等的组件。其中 CERN 加速器控制系统的控制设计并实现了基于 ZeroMQ 的新一代通信中间件(RDA3),并将该架构应用到其所有加速器控制系统和 GSI FAIR 项目^[16-17]。PSI 利用 ZeroMQ 在加速器模型和消息记录上进行了深入的研究,实现了基于 ZeroMQ 的 Publisher-Subscriber 和多部分消息框架消息记录和实时监测加速器状态的功能^[18];还实现了高效的大型和小型探测器的数据流处理。其他加速器也利用 ZeroMQ 实现了数据采集、数据传输组件、基于消息机制的数据分发等功能的开发,并进行了广泛和深入的研究测试^[19-20]。

根据 ZeroMQ 的上述特点,参考其国外加速器上广泛的使用,HIRFL-CSR 流诊断控制系统升级方案中选用 ZeroMQ 实现前端探测器的数据传输和分发功能。

3 CSRe 束诊数据采集系统升级

CSRe 束诊控制系统目前已实现大多数探测器的基于 EPICS 的升级,并进行了在束测试,其部分探测器的升级系统的在束测试结果介绍如下。

3.1 DCCT 控制系统的升级

同步加速器使用直流束流变压器(DCCT)测量同步环束流流强信息,CSRe 的流强在 mA 量级范围内,经过 Bergoz NPCT 电子学处理束流信号后输出的电压幅值范围为 ± 10 V,其 DC 带宽在 ± 20 mA 时的量程范围时为 8 kHz,其他量程范围内时的输出电压信号带宽为 10 kHz^[21]。原有 DCCT 的数据采集使用 NI USB 6210,其中采样率最大为 250 kHz,16 位 ADC 分辨率。根据物理需求,DCCT 测量需实现 $1 \mu\text{A}$ 的测量分辨精度,同时实现束流流强基于事例触发的数据采集。结合上述参数 NI USB 6210 的数据分辨为 $0.6 \mu\text{A}$,因此升级后的采用基于 cRIO 架构的

采集卡 NI 9239, 其采样率为 50 kHz, 24 位 ADC 分辨率, 可以达到 0.002 μA 的数据分辨率。升级后的控制系统架构如图 5 所示, NI 9064 是带有 FPGA 编程和运行 NI Linux Real-Time 操作系统实时处理器, NI 9402 用于接收 DCCT 的 D 事例触发。该架构主要由数据显示和参数设置的 GUI 层, 数据传输和发布功能的实时操作系统层和实现数据采集和处理的 FPGA 三层组成, 其主要功能描述如下。

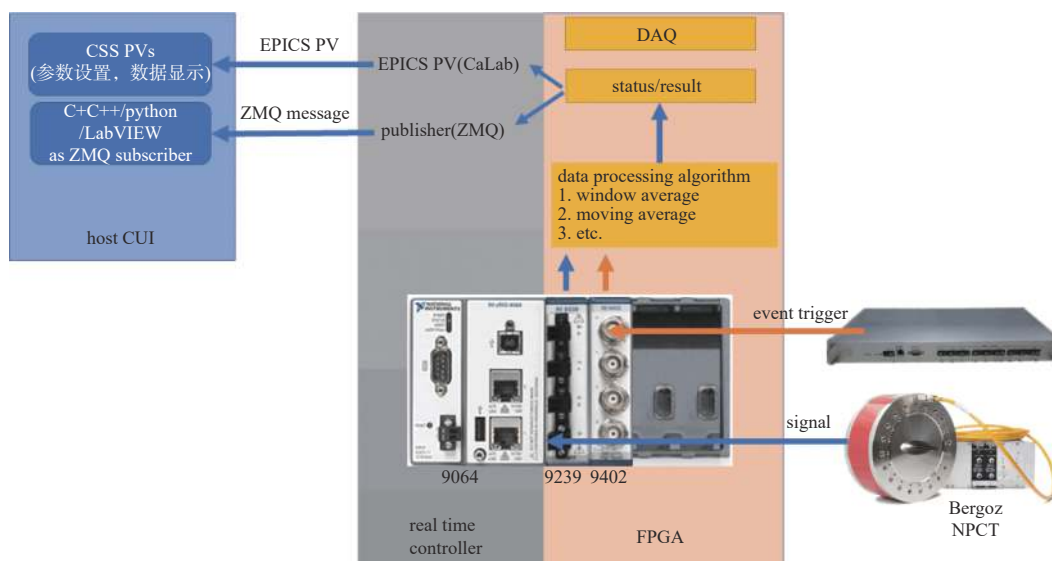


Fig. 5 System architecture of the DCCT control system

图 5 DCCT 控制系统架构

(1) 参数设置: DCCT 控制系统中主要实现如下参数: 数据处理算法、平均点数、基线偏移补偿值、采样间隔以及采样模式。DCCT 采样可以实现连续采样和触发采样控制, 其中连续采样则在特定采样间隔下进行不间断的采样工作, 而触发采样则是接收虚拟加速器发送的 D 事例, 在 D 事例触发下实现 DCCT 的特定时间或者特定点数的数据采集。

(2) 变量发布和数据显示: DCCT 控制系统中的数据显示功能主要实现 DCCT 采集的束流流强信号显示、设置的参数、系统状态量。高速采样的 DCCT 数据通过 ZeroMQ 实现 Publisher-Subscriber 模式的数据发布, 同时也实现了基于 CA Lab 的 EPICS PV 变量的发布。设置参数和系统状态量也是以 EPICS PV 变量形式发布, 客户端工具, 如 CSS、MEDM、caQtDM 等读取网络上 PVs, 然后以特定的形式显示出来。

(3) 数据采集和处理: DCCT 控制系统的的核心数据采集功能在 NI cRIO 9064 上实现, RT 上的 FPGA 程序按照设定频率从 NI 9215 上读取数据, 并将数据按照特定的格式保存至 FIFO 队列中, RT 上的非 FPGA 程序也将定期从 FIFO 中读取采集到的数据, 经过处理之后发布成 PV 变量。在 FPGA 上实现了窗平均、简单滑动平均 (Simple Moving Average) 和指数滑动平均算法 (Exponential Moving Average) 三种平均算法^[22], 用户可以根据现场束流状况采用合适的算法实现束流流强信息的处理, 并显示原始采样数据或者某种平均算法处理后的数据。参数设置功能亦由客户端和服务端两部分组成, 服务端在 NI cRIO 9064 上实现。

CSRe 升级后的 DCCT 控制系统界面如图 6 所示, 该界面目前已在 CSRe 稳定在束运行, 且可嵌入到 HIRFL EPICS 整体控制系统的界面, 供调束和实验时使用。

3.2 BPM 控制系统的升级

CSRe 采用 Shoe-Box 类型的 BPM 适合重离子束团信号的测量。探针尺寸设计为 250 mm \times 130 mm (孔径), 在束流尺寸较小的两处为 170 mm \times 110 mm (孔径); CSR 系统束流的回旋频率为 0.7~2.1 MHz, 由于高频捕获过程中束团长度的变化, 束团感应信号的谐波成分也应考虑在内^[1], 选用的 NI 公司生产的 PXI-5105 示波器卡实现 CSRe 的数据采集, 其最高采样率可达 60 MHz, 精度 12 bits。因此, 利用该 BPM 数据采集系统可以实现 BPM 束流信号的宽

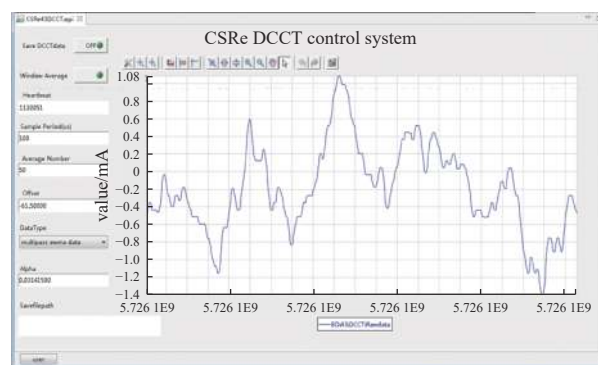


Fig. 6 GUI of the DCCT control system at CSRe developed with CSS

图 6 基于 CSS 开发的 CSRe DCCT 界面

带信号处理,实现束流的监测和相关参数测量。可以监测 CSRe 的注入束流和由于 CSRe 设计参数和实际参数差异导致出现的单束团现象;测量 CSRe 全环 BPM 的闭轨位置;利用 BPM 各极板的采样信号进行差、和信号的计算、傅里叶变换等信号处理,可以观测因为束流横向振荡形成的边带,进而计算束流的工作点、动量分散;同时利用统计学知识,对多次测量的工作点值和动量分散值进行分析,可以得出利用该数据采集系统测量前述两种束流参数时该系统的测量精度。BPM 在加速器调试和束流参数测量中发挥着重大作用,因此有必要实现稳定、易用的控制系统的升级。

(1)束流诊断控制系统硬件系统

与 CSRm 采用 B 事例触发 BPM 数据采集功能不同的是,束流通过从 CSRm 用快引出方式引出然后注入到 CSRe,周期一般是 20 s 左右,因此可以使用束流信号作触发,设定 NI-PXI-5105 采样率为 60 MHz,束流在 CSRe 中至少能够保持束团状态几个 ms,不需要高频捕获即可实现束流的位置测量。

(2)软件系统

BPM 数据采集系统在系统升级前采用 LabVIEW 开发,其测量控制界面如图 7 所示,其中多个 BPM 采样机箱之间通过 Data Socket 进行数据通信实现束流位置信息的汇总。升级后的 BPM 测量系统首先通过 CA Lab 实现 PV 变量的发布,并利用 CSS 开发了测量控制界面。升级后的界面在 CSRm 进行了在束测量,图 8(a)为 BPM 测量的控制界面,图 8(b)显示了 CSRm 一次测量过程中所有 BPM 的水平、垂直方向位置随时间的变化趋势。BPM 测量系统中发布了原始采样信号,傅里叶变换信号,束流位置信息等测量数据,根据不同的应用需求,用户可以方便

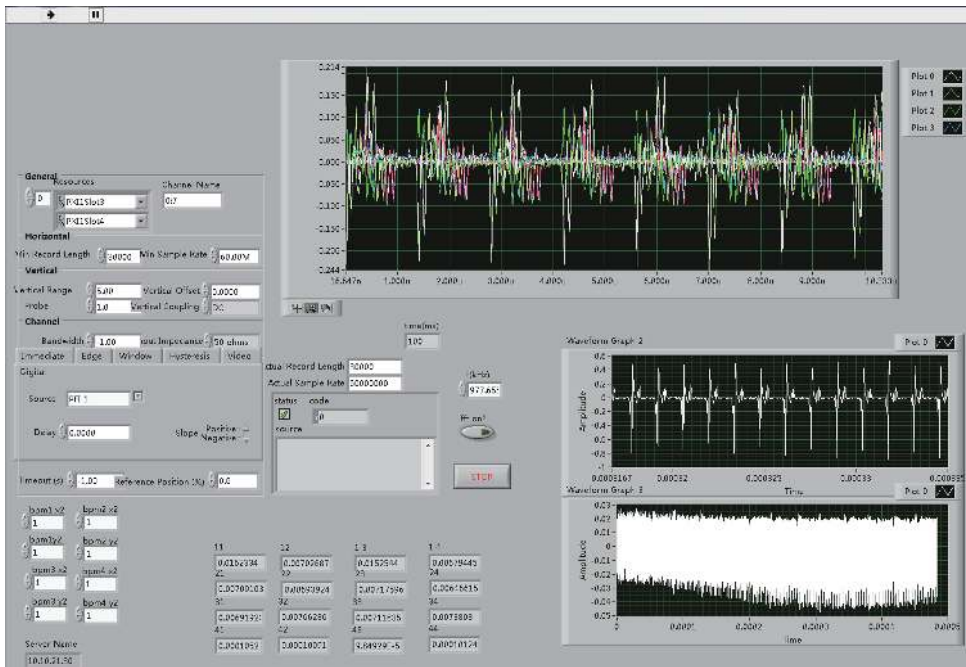
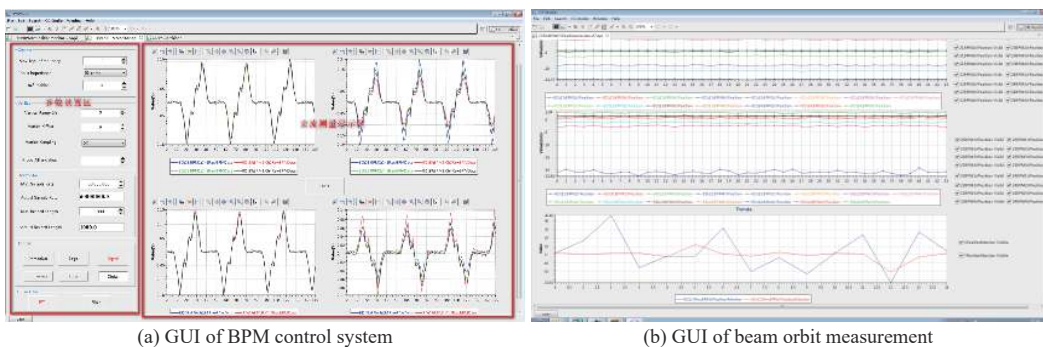


Fig. 7 Data acquisition system of BPM control system based on LabVIEW before the upgrade

图 7 基于 LabVIEW 的升级前的 BPM 数据采集系统界面



(a) GUI of BPM control system

(b) GUI of beam orbit measurement

Fig. 8 Beam position and beam orbit GUIs of BPM control system after upgrade

图 8 升级后 BPM 测试及轨道测量界面

的通过 PV 变量获取相应数据,进行实时的数据监测和离线束流参数的分析处理,相比 DataSocket 面向单用户连接的方式具有更高的灵活性和扩展性,升级后 OPI 具有更强的共享性和通用性,可以集成到整个控制系统的上层控制软件中,只要安装配置了 CSS,都可以运行该 OPI。

(3) 测试结果

采集的 CSRe43P1 BPM 内外两个极板信号离线数据如图 9(a)所示,并利用该采样数据计算注入点处前 100 圈的逐束团束流位置,计算结果如图 9(b)所示。

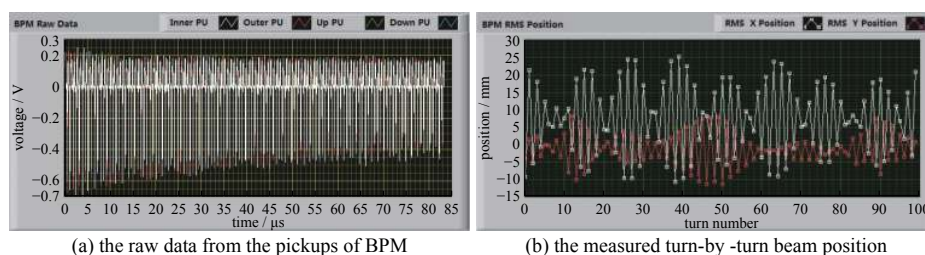


Fig. 9 Beam position measurement results at the injection of CSRe

图 9 CSRe 注入点处的 BPM 测量的测量结果

据图 9(b)中的位置信息,束流在注入点处存在一定程度的振荡,其水平方向的位置范围为 $[-10.72, 25.24]$ mm,垂直方向的位置范围为 $[-11.93, 8.26]$ mm;该振荡在一定程度上影响了注入效率和存储的束流流强,需要加速器物理人员进一步查找原因以减小振荡。

4 CSRe 其他探测器的升级情况和 HIRFL-CSR RIBLL 升级情况介绍

目前束流诊断控制系统实现了 CSRe 上法拉第筒、狭缝和荧光靶的 EPICS 系统升级,升级后的界面分别如图 10 所示。且完成升级的 CSRe 束流诊断系统均可在线使用,并可集成到 CSRe 整体控制系统。

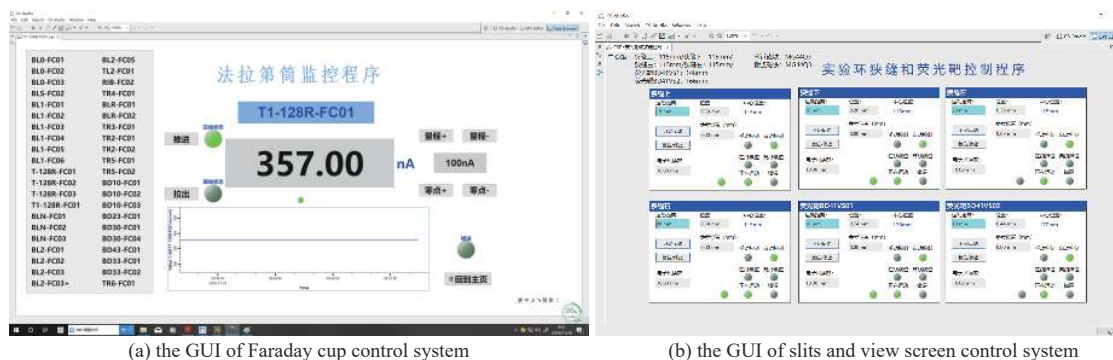


Fig. 10 GUIs of Faraday cup, slits and view screen developed with CSS

图 10 基于 CSS 开发的法拉第筒、狭缝及荧光靶界面

5 结论

HIRFL 控制系统目前已基本实现基于 EPICS 框架的升级改造,各种数据信息全部存储在基于以太网的 EPICS IOC 数据库中。对于使用 LabVIEW 开发 I/O 设备驱动程序的用户来说,通过 CA Lab 实现 EPICS SoftIOC 的开发,实现 EPICS PV 变量的发布,不需要重新编写 EPICS 驱动程序,对于束流诊断大多数探测器采用 LabVIEW 开发的数据采集系统来讲,经过简单的配置即可以实现与 HIRFL 整体系统的数据通信。

CA Lab 接口可以快速实现基于 LabVIEW 的 EPICS CA Sever 的开发,可以连接到以太网上,网络上的任何被授权的主机都可以通过 CA 访问,读取 EPICS 系统中的数据。

目前已经完成了 CSRe BPM、DCCT、狭缝、荧光靶和法拉第筒的基于 CA Lab 的 EPICS 升级,并且 CA Lab 轻量级、高性能、支持所有 EPICS 数据类型的特点通过现场在束测试结果得到了验证。HIRFL 上的 CSRe 和 RIBLL 等束线上的大部分探测器也已经实现了基于 CA Lab 的 EPICS PVs 发布和基于 CSS 的界面开发,开发的每种类型的探测器的 CSS 界面可以方便地嵌入到 HIRFL 加速器整体控制界面。后续将会实现束流诊断其他探测器控制系统的基于 CA Lab 的 EPICS 系统升级和应用。

参考文献:

- [1] 毛瑞士. CSR闭轨测量系统的建立[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2008. (Mao Ruishi. The closed-orbit measurement system of CSR. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008)
- [2] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器冷却储存环[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1787-1794. (Xia Jiawen, Zhan Wenlong, Wei Baowen, et al. Heavy ion cooler-storage-ring synchrotron in Lanzhou. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11): 1787-1794)
- [3] 顾科伟. EPICS在CSRe控制系统中的应用[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2016. (Gu Kewei. The application of EPICS in CSRe control system. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016)
- [4] 张德敏, 金晓, 黎明, 等. EPICS在加速器控制系统中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4): 597-600. (Zhang Demin, Jin Xiao, Li Ming, et al. Application of EPICS to accelerator control system. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 597-600)
- [5] 葛良, 张玮, 安石, 等. HIRFL-CSRm电源监测系统[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 025102. (Ge Liang, Zhang Wei, An Shi, et al. HIRFL-CSRm power supply monitoring system. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 025102)
- [6] 邵禄. 基于CompactRIO的对撞区特种磁铁快速温度保护系统设计[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2018. (Tai Lu. Rapid temperature protection system design based on CompactRIO for special magnet in BEPC II. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018)
- [7] Using the LabVIEW Shared Variable[EB/OL]. <http://www.ni.com/product-documentation/4679/en/>.
- [8] Interactively Configuring EPICS I/O Servers[EB/OL]. <http://www.ni.com/product-documentation/14149/en/>.
- [9] Introduction to EPICS[EB/OL]. <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/12/introduction-to-epics.html>.
- [10] LabVIEW EPICS Client I/O Server 2011[EB/OL]. <http://www.ni.com/download/labview-epics-client-io-server-2011/2533/en/>.
- [11] CA Lab (LabVIEW + EPICS)[EB/OL]. https://www.helmholtz-berlin.de/zentrum/locations/it/software/exsteuer/calab/index_en.html.
- [12] 田立明. 基于CompactRIO的多通道数据采集系统的开发与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015. (Tian Liming. The development and design of multi channel data acquisition system based on compact RIO. Harbin: Harbin Engineering University, 2015)
- [13] Yi L I, Chen J, Cong F Y, et al. Data acquisition and analysis system of large frequency-converting blower based on NI CompactRIO[J]. Instrument Technique & Sensor, 2008, 37(8): 44-46.
- [14] ZeroMQ [EB/OL]. <http://zeromq.org/>.
- [15] Message Queue [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Message_queue.
- [16] Sliwinski W, Yastrebov I, Dworak A. Middleware Proxy: a request-driven messaging broker for high volume data distribution[C] //Proc of ICALEPCS'13. 2013: 948-951.
- [17] Lauener J, Sliwinski W. How to design & implement a modern communication middleware based on ZeroMQ[C] //Proc of ICALEPCS'17. 2017: 45-51.
- [18] Chrin J, Aiba M, Rawat A, et al. Accelerator modelling and message logging with zeroMQ[C] //Proc of ICALEPCS'15. 2015: 610-614.
- [19] Ebner S G, Brands H, Kalantari B, et al. SwissFEL-beam synchronous data acquisition-the first year[C] //Proc of ICALEPCS'15. 2015: 276-279.
- [20] Yamashita A, Kago M. A new message-based data acquisition system for accelerator control[C] //Proc of ICALEPCS'13. 2013: 413-416.
- [21] New parametric current transformer user's manual Rev.2.0[M/OL]. <http://www.bergoz.com/sites/www.bergoz.com/files/npctmanual2-0.2017>.
- [22] 李敏. HMM束流诊断前端控制系统的设计与实现[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2015. (Li Min. The design and implementation of front-end control system of beam diagnostics for HMM. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015)