

基于 LabVIEW 和 PXI 的 CSNS 束流发射度控制读出系统研究

李 芳 徐智虹 孙纪磊 曾 磊

(中国科学院高能物理研究所东莞分部 东莞 523000)

摘 要:加速器束流发射度描述了束流的径向性能,是束流品质的一个重要参数。本文描述了双缝扫描法发射度测量的基本原理和方法,基于 PXI 系统及 LabVIEW 软件设计了一套发射度控制及测量方法,以实现束流发射度的实时测量。结合中国散裂中子源工程束晕研究的需要,利用步进电机控制双缝完成位置缝每运动一个步长,角度缝要运动一个束流径向距离的扫描过程;且角度缝每动一个步长,数据采集系统读一次束流信号和一次双缝位置信号,最后将所得数据进行处理。测试及处理方法满足工程需要,在中国散裂中子源工程低能传输段及中能传输段得以验证。

关键词: 双缝扫描;发射度;DSC

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140

Research on beam emittance control and readout system of CSNS based on LabVIEW and PXI

Li Fang Xu Zhihong Sun Jilei Zeng Lei

(Dongguan Campus, Institute of High Energy Physics, dongguan 523000, China)

Abstract: Accelerator beam emittance is an important parameter of beam quality, and it describes the beam's radial performance. The paper describes the double-slit scan measurement principle and method of the accelerator beam emittance, and designs a control and measurement method of double-slit scan based on PXI system and LabVIEW software for achieving real-time measurement of emittance. Combined with the research need of China Spallation Neutron Source project beam halo, using stepper motor control double-slit scan; with every movement completion by one step of position slit, the angle slit exercises a radial distance; with moving one step of the angle slit, the DAQ work one time for beam signal and the two slits' position information, and the resulting data is processed finally. The method meets to project's needs, and is verified in Median Energy Beam Transform and Low Energy Beam Transform of China Spallation Neutron Source project.

Keywords: double-slit scan; emittance; DSC

1 引 言

中子不带电,具有磁矩、穿透性强,能分辨轻元素、同位素和邻近元素,对样品非破坏性的特点,是人类探索物质微观结构的有力手段;中子散射在磁性凝聚态物理、纳米材料、高强度高性能塑料、蛋白质和生物、高温超导机理、同位素识别、工业无损深度探伤、污染及废料处理等领域有广泛应用。中国散裂中子源作为发展中国家的第一台散裂中子源,是开展前沿学科及高新技术研究的先进大型实验平台,能够为我国的多学科创新创造良好的环境。

束流诊断系统^[1]是加速器的眼睛,它对束流和加速器^[2]的各种参数包括束流流强、位置、剖面、能量能谱等进行测量。而束流发射度是反映束流品质的重要物理参数,是加速器和束流输运线设计的重要参数,是实现束流匹配传输、提高束流传输效率的基础,发射度的增长及由其导致的束流损失是严重影响加速其运行的至关重要的因素,因此对发射度进行准确测量从而改善加速器中束流匹配是必不可少的。

发射度的测量^[3]根据不同类型的束流采用不同的测量方法。对于电子束流,基本采用 CCD 成像的方法;对于

能量较低的质子束和负氢离子束,在能量较低时,一般采用截束的方法,例如狭缝法、缝丝法,Allison 仪等方法;在能量较高时,则采用变聚焦强度的方法。北京正负电子对撞机 BEPC II 多次变聚焦强度法测量发射度。合肥同步光辐射源采用 CCD 成像的方法。兰州重离子加速器采用 Alison 发射度仪以及三梯度法 CCD 成像的方法。CREN、LIAC 采用双缝法直接设定阈值来测量处理发射度。日本 J-PARC 和英国散裂中子源 (ISIS) 的发射度测量装置放在中能传输段,采用双缝法进行测量。

CSNS 前端设计两套双缝扫描法发射度测试仪,分别分布在低能传输段 LEBT (low energy beam transform)、中能传输段 MEBT (Median Energy Beam Transform)。

2 发射度概念及双缝发射度扫描仪介绍

中国散裂中子源 CSNS^[4] 组成:一台 80 MeV 负氢直线加速器、一台 1.6 GeV 快循环质子同步加速器、两条束流输运线、一个靶站和 3 台谱仪。如图 1 所示。

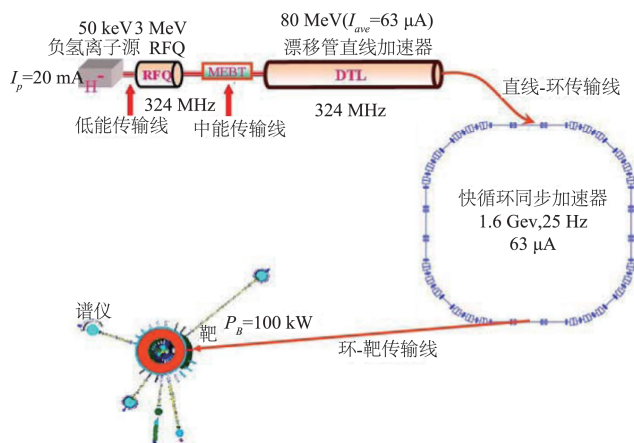


图 1 CSNS 系统构成示意

发射度指束流中带电粒子相空间分散的程度,是束流的一个关键参数。双缝扫描法是一种直接测量发射度的方法,直接测量束流在相空间的密度分布。双缝扫描法需要完成双缝的配合运动、双缝运动位置的读取、束流信息的读取、偏压的控制(用于抑制二次电子)、水流信号的监测等;中国散裂中子源调束阶段的束流信息为 1 Hz、25 μs,发射度双缝扫描仪只工作在此状态,因此要求双缝扫描仪必须严格的 1 s 内两缝配合运动一次、读取一次位置信息和一次束流信息并存文件,位置信息和束流信息要求高精度,第一缝的位置信息、第二缝相对于第一缝的弧距信息、以及束流信息要求以动态三维图显示。

利用 NI EPICS 工具包 (DSC 模块) 将 NI 数据采集卡、运动控制卡、RS485 串口卡做成 EPICS IOC,融入到 CSNS 加速器总体控制系统中。

CSNS 工程采用双缝法对发射度进行测量,示意如图 2 所示。

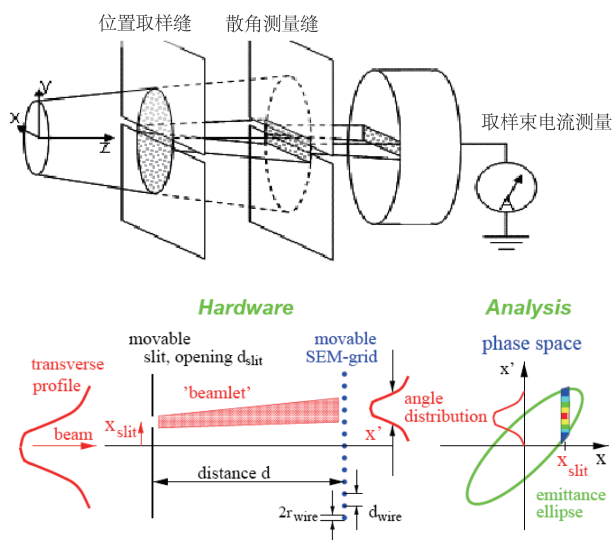


图 2 发射度双缝扫描法示意

在低能传输段发射度硬件设备如图 3 所示。

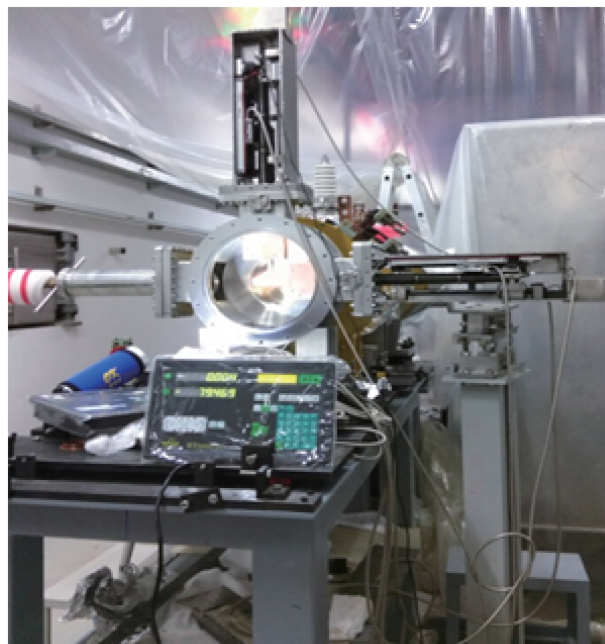


图 3 CSNS 低能传输段双缝扫描法发射度硬件设备

在双缝法发射度测量系统中,第一缝是位置采样缝,第二缝是角度采样缝,其作用是结合位置采样缝的位置确定束流的散角,其物理设计的主要依据是被测束流的散角大小和两缝间距的大小。

双缝发射度的工作原理为,位置缝动一个步长,角度缝相对于该位置缝横扫束流管道,角度缝每运动一个步长,通过串口通信读一次当前两缝相对于束流管道中心的位置数,并读一次法拉第筒感应到的当前的束流信号,将 3 个数据存放在自动创建的文件里,文件的存取程序使用

LabVIEW 编程实现,命名格式为所选位置发射度+当前日期时间。

每套发射度有 X、Y 两个方向,每个方向具有两个缝:位置采样缝和角度采样缝。本论文需要实现每个缝的运动控制及位置信息的读取,X、Y 两个方向束流信号的读取以及偏压的控制、对电子学档位选择的控制、对水流节点的监测、数据的存取、以及数据的处理等。

4 应用方案分析及介绍

该系统^[5]由发射度硬件设备单元、电子学处理设备单元、数据采集处理单元、软件界面显示单元组成。基于 PXIe 平台的控制与读取系统^[6],利用高分辨率的 NI PXIe 数据采集卡完成信号的采集,利用 PXI 步进电机控制器完成双缝之间的配合控制和 PXI 串口卡马达位置信息的读取,利用 LabVIEW 软件开发开环式运动控制系统及数据读取系统,结合 NI 提供的在线分析模块对数据进行实时分析处理,形成了一套完整系统的方案。

如图 4 所示,很好的反应了发射度从探头到电子学再到读数控制系统的实际结构^[7],实物连接如图 5 所示。

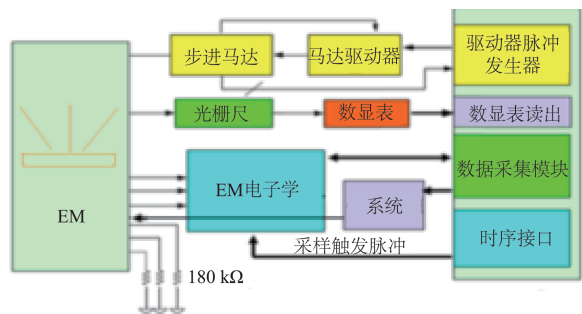


图 4 控制架构

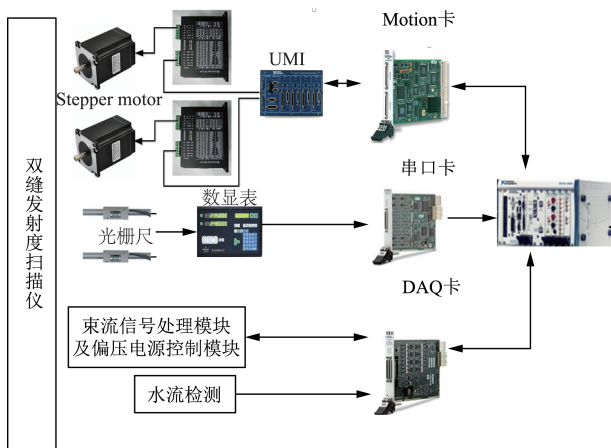


图 5 发射度控制读出系统结构

其中 EM 电子学模块为自行研发的模块,用来对束流信号进行滤波放大等处理。其本身需要 DAQ 卡通过 DIO

和 DAO 的量程选择以及自检功能的控制。

电子学输出信号种类范围:脉冲信号;读取范围: ± 10 V。因此,对读取设备的要求为:ADC 采样率:1 MHz;精度:16 位;输出电压: ± 10 V;DIO:5 V TTL;DAC:0~10 V。

本应用需要完成 1 下功能:

1)控制 4 个步进电机;2)以 4 个光栅尺位置信息,需提供 2 路 RS485 串口,与读取光栅尺反馈信号的数显表进行通信;3)至少提供 2 路模拟量输入通道,各通道间 ADC 独立,同步采集,采样率 1 MS/s/ch,16 bits;4)至少提供 2 路模拟量输出通道,+/−10 V,用于偏压控制;5)至少提供 8 路数字量输入输出通道,电平为 5 V TTL,其中 4 路用于限位开关,2 路用于水流开关节点,6 路量程选择控制信号,2 路偏压 TTL 极性控制。

实现这些功能的方案为:

- 1)4 轴步进马达运动控制卡 PXI-7334 一个;
- 2)DAQ PXIe-6356 一个;
- 3)PXI-8431/8 串口卡一个。

机箱控制器选配:

高性能嵌入式控制器 PXIe-8115,包括 Intel Core i5-2510E 双核处理器,2 GB 内存,250 GB 硬盘

18 槽 PXIe 机箱 PXIe-1065

PXIe 机箱配置、电子学及偏压电源模块实物图如 6、7、8 所示:

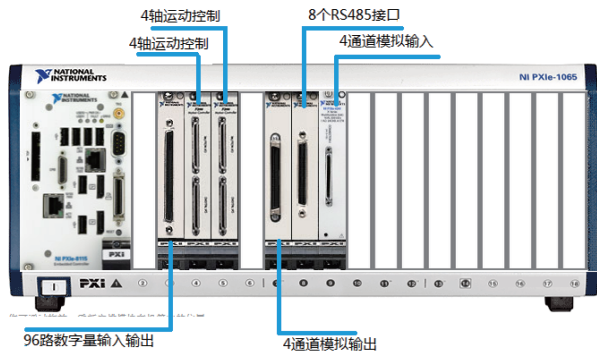


图 6 机箱配置



图 7 EM 电子学机箱

安放在 CSNS 离子源厅里的两套发射度控制读数系统现场如图 9 所示。



图8 偏压电源机箱



图9 离子源厅发射度控制读出设备现场

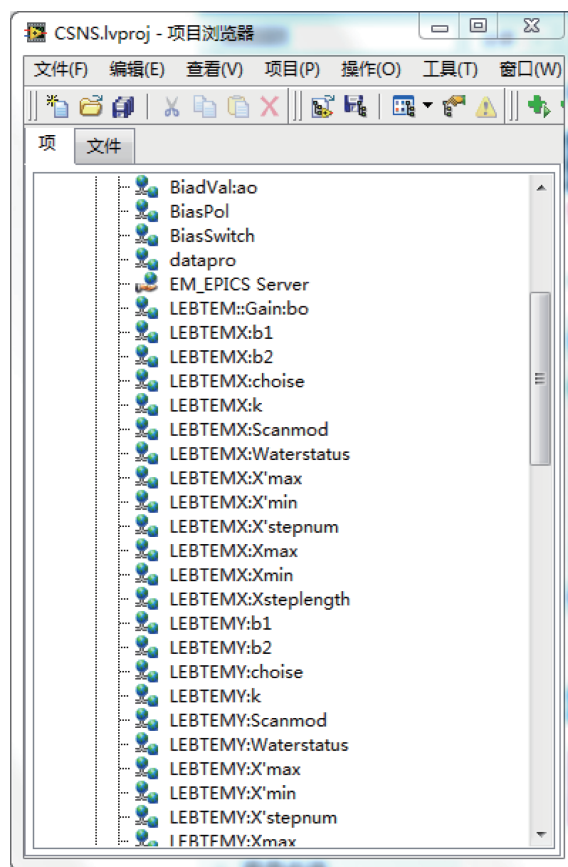
4 软件实现

软件部分使用 LabVIEW 开发者套件 2013 中文版实现,该套件包含了项目所需的 2013 版 LabVIEW 以及 DSC 模块,通过 DSC 模块可以创建 EPICS Server 和 EPICS Client。EPICS^[8]即实验物理及工业控制系统(experimental physics and industrial control system),是 20 世纪 90 年代初由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室和阿贡实验室等联合开发的大型控制软件系统,目前在加速器界得到广

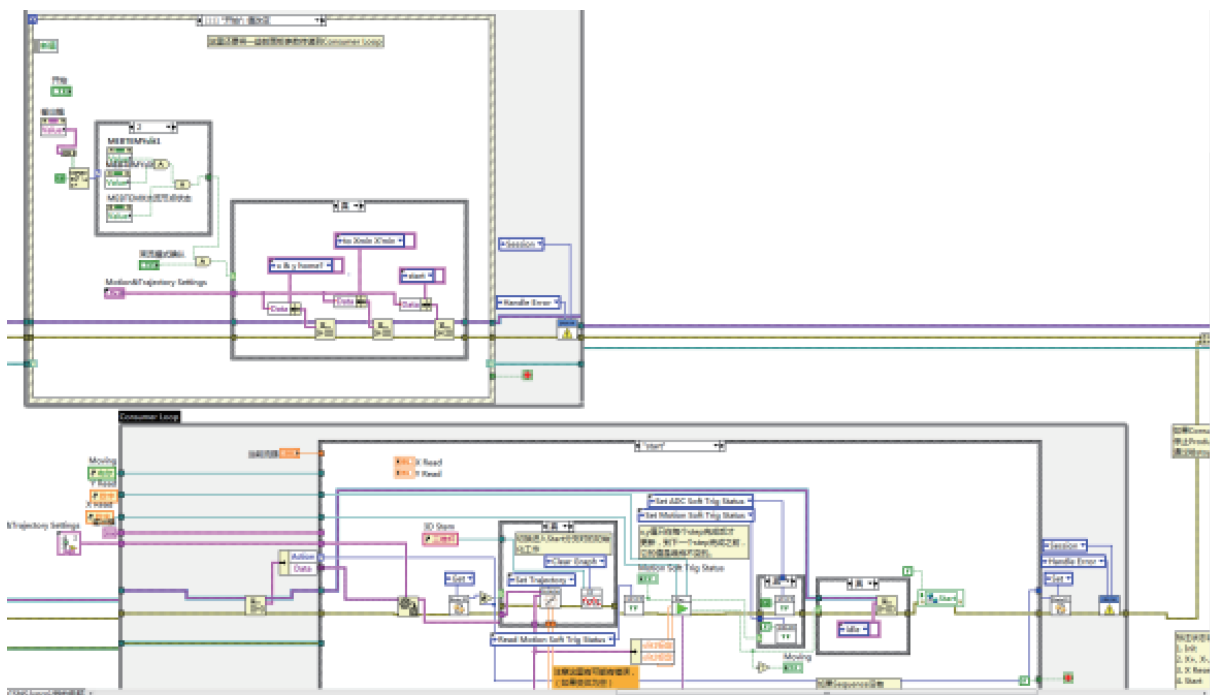
泛应用。CSNS 控制系统也采用 EPICS 平台。DSC 模块提供的 EPICS 接口完美的实现了 LabVIEW^[9] 和 EPICS 之间的通信,基于分布式的 EPICS 主要包括两部分:输入输出控制器 IOC(input/output controller)层和操作员接口层 OPI(operator interface)层。为实现加速器的总体控制,将各个探测系统利用 EPICS 形成一个 IOC,从而完成束流诊断的总体控制,而 DSC 模块的 EPICS Server 可实现这一功能,利用 LabVIEW 编程将 NI PXIe-6358 采集到的束流信息通过 DSC 模块打包成 EPICS PV 量发给控制层,供加速器物理进行分析使用。

4.1 发射度测量软件的架构

在发射度测量中采用生产者消费者模式和握手通信的形式实现对双缝扫描的配合控制、马达运动位置的读取以及对束流信号的采集,主要程序框图如图 10 所示。



(a)带有EPICS Server的项目创建



(b)部分程序框图

图 10 发射度测量软件主要程序架构

在创建工程中,我们通过 DSC 模块创建发射度的 EM-EPICS Server,使其通过 PV 量可以远程控制并访问程序。在程序框图中,利用事件结构来选择待测发射度,并控制程序一步一步运行,即马达运动到位,串口^[10]进行位置信息读取,继而 DAQ 卡收到触发开始工作一次,DAQ 卡 PXIe6358 使用有限的采样工作结束后,告诉马达运动到下一个位置,马达和 DAQ 之间通过握手的方式来保证来一个外触发,马达运动一个步长且 DAQ 采样一次。其中外触发统一由定时系统给出,频率为 1 Hz。使用 NI-PXI 7334 完成马达运动,用 NI-PXIe 6358 来完成水流节点的读取,电子学档位的控制、偏压电源的控制,使用 RS485 串口卡完成位置信息的长距离传输。目前采用两种模式进行发射度的双缝扫描,一种是设置最大最小角度,另一种是在知道发射度在相空间的大概形状后,采用平行四边形法进行更有效更精确的扫描,参数设置如图 11 所示。



图 11 参数设置

前面板如图 12 所示。

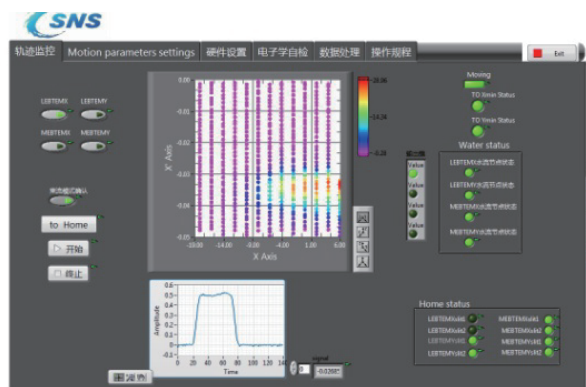
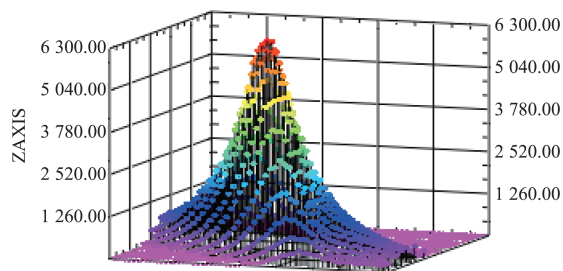


图 12 前面板

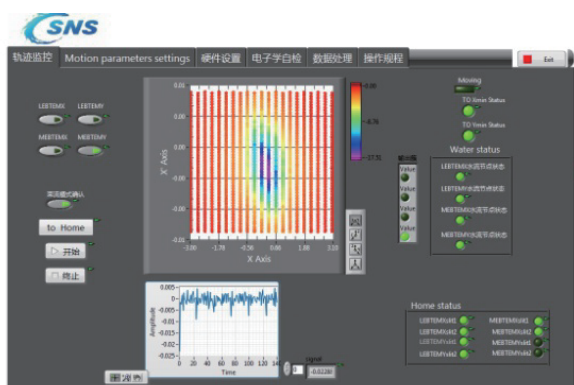
4.2 程序的应用

中国散裂中子源项目 CSNS 前端于 2015 年 5 月安装调试完毕,开始进入调试状态,在调试过程中,已安装的两套发射度(LEBT、MEBT 上各一套)投入使用,发射度是衡量离子源性能优劣的一个重要指标,因此测量系统的硬件和软件可靠性、稳定性及可行性要求非常高,PXI 不但具有可靠性、稳定性和测量精度高等优点,还具有传输速度快、结构坚固紧凑等特点;LabVIEW 图像化开发平台强大的数据采集和信号处理功能能够极大的、轻松的满足程序开发以及数据处理的需求。在整个调试过程中,分别对两套发射度共 4 个方向进行了测试,现以 MEBT EMY 为例子进行分析。首先对测试范围进行设置:Slit1 的最大值最小值分别设置为 -3 mm 和 3 mm,步长设置为

0.3 mm; Slit2 的弧度信息最大值最小值分别设置为 -0.01 mrad 和 0.01 mrad, 运动步数设置为 60, 在线运行后测试界面如图 13 所示。



(a)MEBT EMY发射度三维图



(b)MEBT EMY测试结果

图 13 MFBT EMY 在线测试结果

利用 LabVIEW 编程对数据进行分析^[11], 计算发射度参数 α 、 β 、 $Erms$ 随束流流强百分比变化曲线, 以根据拐点确定精确的发射度参数信息。变化曲线如图 14 所示, 横轴为束流流强平均值的百分比, 纵轴为相应的 α 、 β 、 $Erms$, 以供加速器物理进行计算分析:

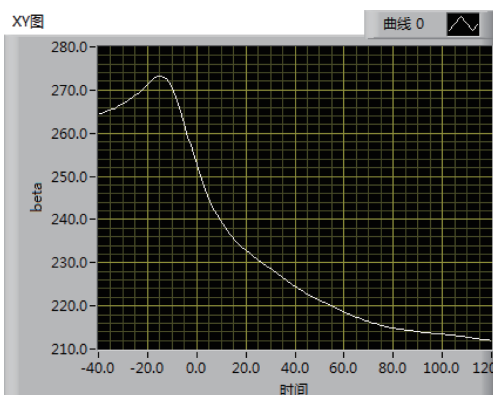
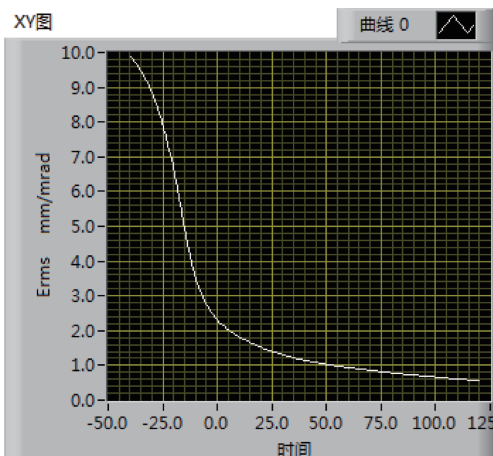
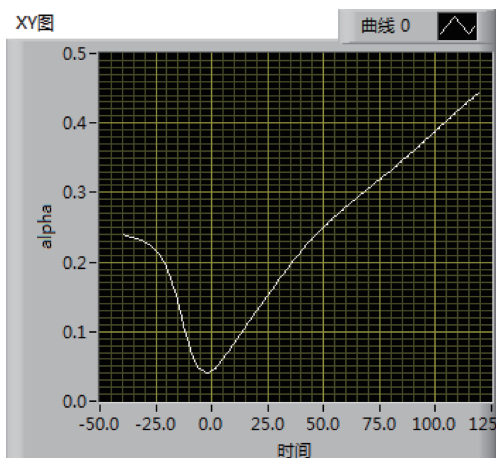


图 14 α 、 β 、 $Erms$ 随束流流强平均值百分比变化示意

5 结 论

该系统使用 PXI 运动控制卡、DAQ 卡、串口通信卡及 LabVIEW 协助完成了双缝发射度扫描测量、电子学输出的束流信号的读取、光栅尺位置信号的读取、电子学档位选择的控制、偏压电源的控制、水流节点的监测。高性能 PXI 系统以及丰富的 LabVIEW 编程模块很好的实现了这些功能, 在 H-离子加速器前端信号强度弱、易受外界电磁干扰的情况下, 完美的展示了 PXI 设备的优异性能, 为加速器物理人员的后期分析处理提供了精确丰富的数据信息, 得到了很大的肯定!

参 考 文 献

- [1] 张华顺. “三截面法”或“三梯度法”测量发射度的条件[J]. 原子能科学技术, 1992, 26(2): 89-92.
- [2] 唐靖宇. 质子加速器基础[M]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2010.
- [3] 孙葆根, 郑普, 卢平, 等. 合肥光源新的束团截面及发射度测量系统的研制[J]. 高能物理与核物理, 2006, 30(8): 792-796.
- [4] 《中国散裂中子源项目建议书》[Z]. 中国科学院, 2007.

- [5] 孙纪磊. 强流低能质子束发射度测量系统研制[D]. 北京:中国科学院高能物理研究所, 2011.
- [6] 李敏, 武军霞, 原有进, 等. 基于 NI 平台的 SSC-Linac 加速器束流诊断控制系统[C]. 中国仪器仪表学术、产业大会, 2012.
- [7] 孙纪磊, 阮玉芳, 肖帅, 等. 强流质子加速器束流剖面分布及束晕测量系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1):190-194.
- [8] 程卫星, 陈永忠, 周伟民, 等. 基于 EPICS 的数据采集系统[J]. 核技术, 2002, 25(12):985-989.
- [9] 刘正琼, 胡丽莉, 唐璇, 等. 基于虚拟仪器的肢体姿态检测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,

29(6):907-913.

- [10] 吕向峰, 高洪林, 马亮, 等. 基于 LabVIEW 串口通信的研究[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(12):27-30.
- [11] 张磊, 孙虹. 基于 FPGA 的高频腔低电平数字控制系统[J]. 国外电子测量技术, 2007, 25(12):27-30.

作者简介

李芳, 1980 年 2 月出生, 理学硕士, 工程师, 主要研究方向为加速器束测技术、数据采集及处理技术等。
E-mail: lifang@ihep.ac.cn

(上接第 20 页)

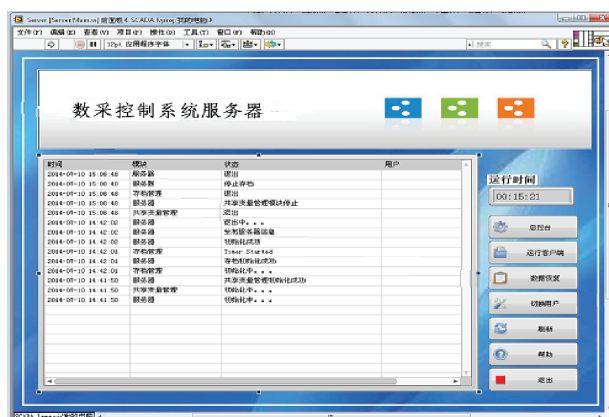


图 5 SCADA 系统服务器端界面

同步精度以及实时处理速度等主要技术指标均达到预期指标。每次试验只需要简单的对更改通道进行重新配置, 并加载新的算法, 就能对新的试验场景进行数据监测和控制, 极大的提高了工作效率。

4 结论

基于 NI CompactRIO 的分布式远程监控 SCADA 系统使用 NI 模块化硬件和软件作为开发平台, 具备非常灵活的特点, 并且在通信和配置方面继承了 LabVIEW 软件中的优点。选用 CompactRIO 作为中央测量单元, 通过 LabVIEW 连接控制这些分布式测量平台^[10]。从技术角度讲, NI CRIO 系统和 LabVIEW 开发环境的无缝连接帮助用户可以轻松的通过图形化开发环境与底层硬件交互, 快速搭建嵌入式系统控制和数据采集应用, 极大降低了系统开发、生产的技术风险。LabVIEW 强大的数据采集和信号处理功能极大地节省了 SCADA 数据采集系统的开发时间, 在 LabVIEW RT 和 FPGA 模块的配合下使得 SCADA 系统能够实时高质量地完成数据采集、信号处理、数据传送和数据存储的工作, 为整个监控对象安全监测系统提供了灵活、强大的底层数据支持。

参考文献

- [1] 王建新, 杨世凤, 史永江, 等. 远程监控技术的发展现状和趋势[J]. 国外电子测量技术, 2005, 24(4):9-12.
- [2] 李伯均. CompactRIO 嵌入式产品井下高速信号采集处理应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(7):74-76.
- [3] 龚潺, 张丹, 桑小冲, 等. 基于 PXI 的卫星地面测试信号采集控制系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3):129-132.
- [4] 林林涛, 邹黎华, 耿勇男, 等. 多类型多通道的数据采集系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(增刊 1):236-239.
- [5] 秦强, 吴志刚, 邓细凤, 等. 基于 PXI 总线的旋转试验台综合数据采集系统设计[J]. 直升机技术, 2013(4):41-46.
- [6] 舒双宝, 罗家融, 薛二兵, 等. 基于 PCI 的托卡马克高速数据采集系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(2):120-125.
- [7] 周鹏, 许钢, 马晓瑜, 等. 精通 LabVIEW 信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
- [8] 孙红, 刘彪. 基于 LabVIEW 和 CRIO 的海洋环境监测平台的构建[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(3):78-80.
- [9] 王孟杰, 杜恒, 陈淑梅. 基于 NI CompactRIO 的液压挖掘机测试系统设计[J]. 电气与自动化, 2015(1):180-183.
- [10] KAISER W, RUNDEL P, 汤敏. 利用 NI LabVIEW 和 CompactRIO 进行森林环境监控[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(12):64-65.

作者简介

寇煜承, 1990 年, 出生, 工学本科, LabVIEW 开发工程师(CLD), 主要研究方向为数据采集、射频、自动化测试等。
E-mail: yy61kouyucheng@126.com