

# 基于 CompactRIO 的中性束高压平台电源数据采集系统设计与应用

任磊磊, 余佩炫, 罗萃文, 刘鹤, 周建

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

**摘要:** 为解决高电压、大电流和强磁场对中性束注入系统高压平台电源数据采集系统的影响问题, 通过在 CompactRIO (简称 cRIO) 控制器中运行 NI Linux Real-Time 实时系统, 结合 LabVIEW 图形化开发工具, 采用 FPGA 用户 I/O 采集模式与节点 I/O 采集模式混合编程, 设计了 1 套全新的基于 cRIO 平台的数据采集系统; 该套采集系统实现了中性束注入系统中第 2 条束线中高压平台灯丝电源、弧流电源等信号在不同采集频率的混合测量需求; 通过在 HL-2A 放电实验中测试表明, 采集系统稳定可靠, 抗干扰性能强, 上位机界面操作灵活, 维护方便。

**关键词:** 中性束高压平台电源; CompactRIO; 数据采集; FPGA

## Design and Application of Power Data Acquisition System Based on CompactRIO for Neutral Beam High Voltage Platform

Ren Leilei, Yu Peixuan, Luo Cuiwen, Liu He, Zhou Jian

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that high voltage, high current and strong magnetic field effect to the power data acquisition system for the high voltage platform of the neutral beam injection, the new data acquisition system is designed based on the cRIO platform through the NI Linux Real-Time system runs in the CompactRIO controller, the LabVIEW graphical development tool, the mixed acquisition mode of the user I/O and the node I/O programming in FPGA. The data acquisition system realizes the demand for the mixed measurement of the signal of the filament power and the arc current with different acquisition frequencies in the high voltage power supplies of the second line of the neutral beam injection system. The test in HL-2A discharge experiment shows that the acquisition system is stable and reliable, anti-interference performance is strong, the upper computer interface operation is flexible, and maintenance is convenient.

**Keywords:** neutral beam high voltage platform power supply; CompactRIO; data acquisition; FPGA

## 0 引言

中性束注入器加热系统是热核聚变托卡马克实验装置上用于等离子体加热的一个重要设备。中性束电源系统是中性束加热等离子体的重要设备, 它直接关系中性束加热等离子体实验的产生和注入效果。

HL-2A 中性束原有的第 1 条束线以太网数据采集器工作由于当时技术限制, 不能支持多种采样频率混合采集, 在高压平台上仅能完成高速采集, 采集器容易出现死机和打火现象。对于低速长时间采集需求, 需要进行 V-F 和 F-V 电路转换, 中间环节复杂。V-F 和 F-V 电路经过长期充放电后, RC 电路受温度影响, 导致转换基准频率偏移, 线性度差, 从而采集精度低, 信号测量效果不理想。而中性束高压平台上实验环境比较恶劣, 对采集器抗干扰

性能要求较高, 因此在第 2 条束线的采集系统建设时, 需要进行重新规划和设计, 满足多路信号和多种采集频率的测量需求。

## 1 系统结构与原理

中性束注入装置系统中高压平台电源部分包括灯丝电源、弧流电源, 加速电源和抑制极电源, 被测量的参数包括灯丝电源电压电流、弧压弧流、加速极电流、压电阀驱动电压、放电室气压等参数<sup>[3-7]</sup>, 其中灯丝电源、弧流电源和加速极电源同时需要进行高速和低速采集。

高压电源测量信号首先进入 NBI 高压测试仪, 对测量信号进行调理后, 直接接入 cRIO 系统的 C 系列采集模块, 由于 cRIO 坚固的抗干扰能力, 在第二条束线硬件建设上直接将 cRIO 采集设备悬浮于高压平台, 和高压平台处于等电位, 从而避免传统 V-F 和 F-V 转换电路的应用上对信号精度的影响。cRIO 采集系统所需要的触发信号和以太网接口信号均通过光电转换器接入, 通过光纤传输的方式隔离来自电源系统的高压, 避免高压电源对数据采集系统造成误触发干扰并保证设备安全运行。中性束电源数据采集现场不适宜实验人员长时间在现场工作, 采用远程网络通信,

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金(11775071)。

作者简介: 任磊磊(1985-), 男, 安徽省淮北市人, 硕士, 中级工程师, 主要从事 HL-2A 托卡马克装置诊断系统数据采集与控制方向的研究。

设置 1 台工控机为上位机，对 cRIO 采用分布式数据采集与集中管理模式<sup>[8-10]</sup>，如图 1 所示。

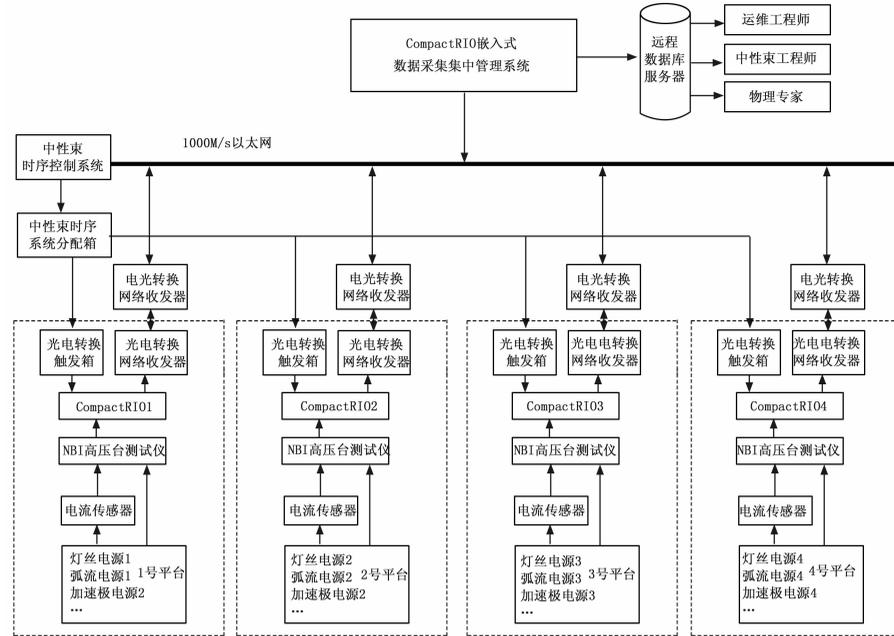


图 1 中性束高压平台数据采集系统的整体设计框图

## 2 硬件设计

中性束高压平台数据采集系统共包括 4 个平台，其中每个平台需要部署一个 NI cRIO 嵌入式设备。每个 cRIO 嵌入式设备包含 1 个 cRIO-9114 机箱，1 个实时控制器 cRIO-9025，1 个 9402 数字 I/O 模块，2 个 NI9223 采集模块和 2 个 NI9215 采集模块。

选用 cRIO 作为设计本套采集系统的硬件设备，是因为 cRIO 是一种小巧而坚固的工业化控制和采集系统，利用 LabVIEW FPGA 基本的 I/O 功能，用户可以直接访问 cRIO 硬件的每个 I/O 模块的输入输出电路。所有 I/O 模块都包含内置的接口，信号调理，转换电路以及可选配的隔离屏蔽，可以使用 LabVIEW，LabVIEW RT 模块和 LabVIEW FPGA 模块快速实现开发 cRIO 嵌入式系统。

其中 cRIO9025 是一款嵌入式实时控制器，具有 800 MHz CPU，512 MB DRAM，4 GB 存储容量，包括 2 个以太网、一个 USB 和一个串行端口。核心内置数据传输机制，负责把数据传到嵌入式处理器进行数据记录，与上位机通信。NI 9223 作为高速、同步 C 系列模块，提供最高采样率 1MS/s/ch，分辨率 16 位，最大模拟输入电压±10 V，4 路差分同步通道隔离模拟输入通道。NI 9215 模块提供最高采样率 100 kS/s/ch，分辨率 16 位，最大模拟输入电压±10 V，4 路同步采样的模拟输入通道，具有通道一地面接地双重隔离屏障，能够实现安全性、抗干扰性和高共模电压范围。NI 9402 具有 4 通道，LVTTTL，双向，最大 55ns 传播延迟时间的数字输入/输出模块，本系统中主要利用该模块的输入功能，获取快速采集和慢速采集的触发信号，方便进行触发前后的信号采集工作。

根据中性束高压平台电源采集系统的测量需求，综合考虑 cRIO 嵌入式设备中 cRIO9025 缓存容量和以太网数据传输速度，整个采集系统的设计参数如下所示：NI9223 支持采样频率 500KS/s 触发后 5S 数据采集，NI9215 支持采样频率 100 KS/s 触发前 5S，触发后 10S 数据采集。目前该测量系统最大支持 32 路快速和 32 路慢速同时采集，支持后期扩展 C 系列模块。

## 3 软件设计

采集系统软件基于 LabVIEW2015<sup>[1-2]</sup> 开发，整个软件架构分为数据采集集中管理人机界面（HOST VI），实时应用程序（RT VI），FPGA 层程序（FPGA VI），三者之间的相互关系及作用如图 2 所示。

其中 HOST VI 主要用于数据采集集中管理，RT VI 主要用于采集模块初始化，数据读取与存储。FPGA VI 主要用于巡检触发信号，实际数据采集，判断触发位置，通过 FIFO 写入数据到 RT VI。



图 2 高压平台数据采集系统软件框架

图 3 所示为中性束高压平台数据采集系统软件运行流程图，首先 cRIO 采集设备上电启动并自检后，向数据采集集中管理人机界面层（HOST VI）注册。注册成功后，HOST VI 通过 ODBC 数据库，在任务管理系统中根据任务编号获取 cRIO 采集配置参数（包括采样率，采样长度，触发模式等参数），将采集配置参数通过 UDP 通信协议发送给指定 cRIO 设备。cRIO 设备接收到配置后，开始初始化 C 系列采集模块所需要的采集配置信息，并发送初始化完毕消息给 HOST VI。cRIO 采集设备等待时序控制系统发出触发信号，一旦触发到来，即开始进行数据采集。采集完毕后，将数据首先存储到 cRIO 硬盘内部，并通知 HOST VI 通过 FTP 方式获取 cRIO 硬盘中的采集数据。HOST VI 获取数据后，对数据进行整理，按照实际需要保存的数据长度进行保存并上传到远程数据库，供实验人员读取和分析。

### 3.1 数据采集集中管理人机界面

数据采集集中管理人机界面主要用于集中管理 4 个 cRIO 设备，获取 cRIO 需要的采集配置参数、采集测试、单播/广播方式发送消息到 cRIO 采集设备、远程重启、监视运行状态、上传数据到远程数据库与历史数据回放。人

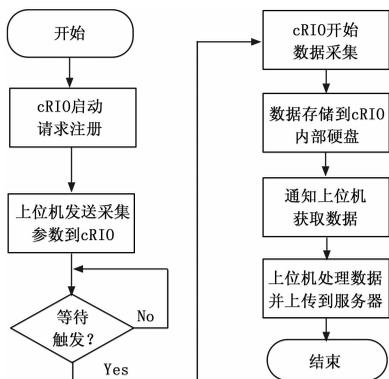


图 3 数据采集系统软件运行流程图

机交互界面中所有与 cRIO 采集设备交互的操作, 均通过事件结构的方式实现, 减少程序占用的 CPU 资源, 确保程序框图响应用户在前面板上的操作, 数据采集集中管理人机界面如图 4 所示。



图 4 数据采集集中管理人机交互界面

实验人员能够通过界面查询采集系统配置参数, 包括任务 ID, 采样频率, 采样长度, 设备在线情况, 运行状态和数据存储与上传状态。

cRIO 采集设备所需配置参数通过配置 ODBC 数据库管理器, 从 HL-2A 数据库的系统管理结构 (SYS. ACT)、采集任务结构 (SYS. TSK)、通道配置结构 (SYS. CH)、采集模块结构 (SYS. MDL)、存储信息结构 (SYS. INF) 共 5 个文件中解析获取。在配置信息获取成功后, 人机交互界面将配置信息转发给对应的 cRIO 采集子系统。采集子系统收到子系统的配置表后, 对采集模块设置初始化, 并发送配置完毕消息给人机交互界面。

在每个 cRIO 采集设备初始化完成后, 用户管理界面程序中有两种运行模式, 即测试和实验模式。对于测试模式, 程序初始化完成后直接进入软件触发状态, 按照测试指定数据长度存储。对于实验方式, 程序初始化后需要监听 HL-2A 托卡马克装置放电任务消息系统发送的 UDP 消息, 消息格式如下所示: +PLS\_XXXXX, 其中 XXXXX 表示 5 位放电炮号, +TIM\_XXXXX, XXXXX 表示放电时间长度, 单位为 ms, 按照实际放电长度和数据约定格式保存。

当 cRIO 采集设备获取到采集数据后, 通知人机交互界面获取原始数据并根据 HL-2A 托卡马克数据采集诊断系统要求, 每 200 炮采集数据放入一个文件夹, 保存文件夹

的名称按照实验序号自动计算取整的 5 位字符命名。(例如实验序号为 34567, 文件夹名称则为 34400), 采集数据 (.DAT) 保存在 DATA 文件夹下, 和采集系统对应的通道 INF 文件 (.INF) 保存在 INF 文件夹下。

### 3.2 实时应用程序

实时应用程序 RT VI 在控制器上运行, 通过编程与 FPGA VI 通信。通过 RT VI 可记录数据、控制数据传输定时及创建一个带 FPGA 终端的系统, 并将其用作组件。本系统中编写的 RT VI 主要用于完成与 FPGA 层的交互工作, RT VI 采用状态机编程, 共有 3 个线程, 分别用于实现接收用户管理界面发送的配置消息, 发送采集设备状态信息, 包括采集器开机正常、初始化正常、采集暂停、采集等待、等待触发、触发到、采集完成、数据上传等消息, 加载 FPGA 界面程序编译的二进制文件, 完成对采集子系统的初始化工作, 读取来自底层硬件的原始采集数据, 存储原始数据到 cRIO 采集系统硬盘, 通知上位机获取 cRIO 硬盘中的采集数据, 其中主线程包括 cRIO 设备初始化, 打开 FPGA, 配置 DMA 深度, 等待触发, FIFO 读取数据, 存储数据和关闭 FPGA 的操作。

主线程中 RT VI 程序运行在 Real-Time 实时操作系统中, 使用中断的编程方法保证了在 FPGA VI 和 RT VI 之间的同步操作, 在等待中断的同时可执行其他操作, 能够及时通知事件到来 (例如, 数据变为有效、产生错误或任务已完成)。另外 RT VI 在和 FPGA VI 之间传递数据, 使用直接内存访问 (DMA) 方式。选用 DMA 传递数据, 其优势在于 DMA 是一种基于 FIFO 传输数据的方法, 释放了主机处理器, 使其可在数据传输的过程中执行其他计算, 传输数据数组时保存 FPGA 资源, 能够自动同步 RT VI 和 FPGA 终端的数据传输, 保证数据能够快速传输与存取。本文设计的数据采集系统 RT VI 和 FPGA VI 之间使用 FIFO 进行数据传输的原理图如图 5 所示。

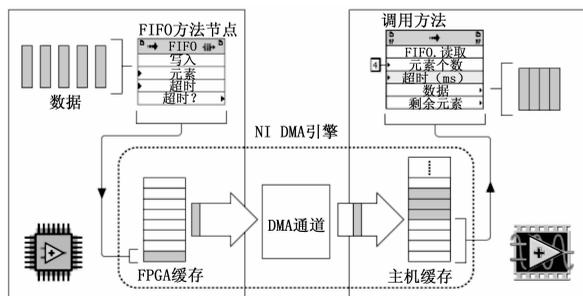


图 5 RT VI 和 FPGA VI 之间使用 FIFO 传输数据原理图

### 3.3 FPGA 界面程序

FPGA VI 是加载至 FPGA 终端并运行的 VI。FPGA 终端是一个可编程芯片, 由逻辑块、I/O 块和可编程互连资源组成。本系统中 FPGA VI 用于主要使用 C 系列采集模块 (NI9223, NI9215) 和控制模块 (NI9402), 负责信号采集、数字模块触发输入信号检测, 包括重置 I/O 方法, 生成 I/O 采样脉冲方法, 获取 I/O 读取状态方法, 创建 FPGA I/O 项, 配置 FPGA I/O 项, 使用 FPGA I/O 节点, 配置 FIFO

深度，配置 FPGA 时基时钟，FIFO 写入等操作。

由于采集系统需要完成不同型号的采集卡在不同采样率下混合测量的任务，因此需要针对不同的 C 系列模块设计采用不同的采集模式，其中 NI9223 模块采用 FPGA 用户 I/O 采集模式，NI9215 采用 FPGA 节点 I/O 采集模式。这是因为产品属性决定，不是所有的 C 系列模块均支持用户 I/O 采集模式，仅有 NI9223 可以使用。

在 FPGA I/O 节点模式下采集时，程序按顺序执行，I/O 节点需要通知模块去采集数据，并且传送到控制器上，实际采集的速率就会受到 C 模块本身可达到的采集速率和速率传输到控制器的时间两方面的限制；而在用户控制 I/O 采集模式下，使用时钟节点来控制模块采样，使用读取节点来进行数据的传输，两者并行，所以采集速率可以达到更高。

其中 NI 9223 的采样率在 FPGA I/O 节点下最大为 350kS/s，而在 FPGA 用户控制 I/O 采集模式下最大为 1MS/s。使用节点 I/O 采集模式如图 6 所示，用户控制 I/O 采集模式程序示意框图如图 7 所示。对于 NI9223 采集模块使用 3 个线程，并行进行时钟速率控制、数据采集与传输、检查数据传输状态。对于 NI9215 采集模块，使用 1 个线程，用于判断采集触发点时刻，传输采集原始数据到 RT VI 程序中。

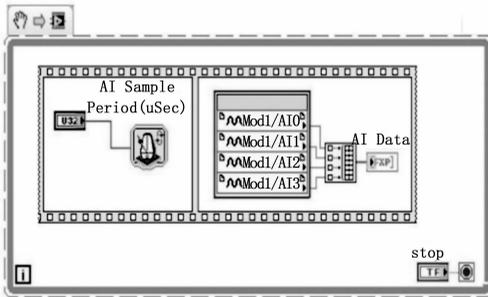


图 6 NI9215 使用 FPGA 节点 I/O 采集模式

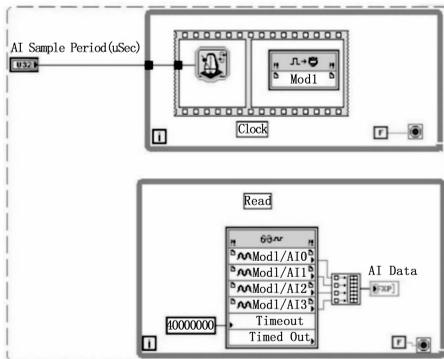


图 7 NI9223 使用 FPGA 用户 I/O 采集模式

### 4 实验结果

为了验证 cRIO 采集设备和 NI9215 和 NI9223 数据采集模块能否正常触发工作，通过在 HL-2A 中性束注入加热真实放电实验条件下对采集系统进行了测试。例如在第

34316 次放电实验条件中，设置 NI9223 采样频率 500K/s，触发后 5s 数据采集，设置 NI9215 采样频率 100K/s，触发前 2s，触发后 7s 数据采集，快采和慢采的触发延迟设定时间为 763.64 ms。图 8 所示是当 cRIO 采集设备获得了一炮实验数据，通过 HL-2A 托卡马克装置实验中使用的图形分析与处理 ProDA (Process Data) 软件软件读取的中性束 2 号束线主要电源的实验参数曲线图。为了进行对比，将 NI9223 高速采集和 NI9215 低速采集的实验参数曲线同时由上至下交叉显示，依次分别为快采和慢采的灯丝电压  $V_{fil}$ 、灯丝电流  $I_{fil}$ 、弧流电压  $V_{arc}$ 、弧流电流  $I_{arc}$ ，引出电流  $I_{acc}$  和离子源气压  $P_{re}$ 。

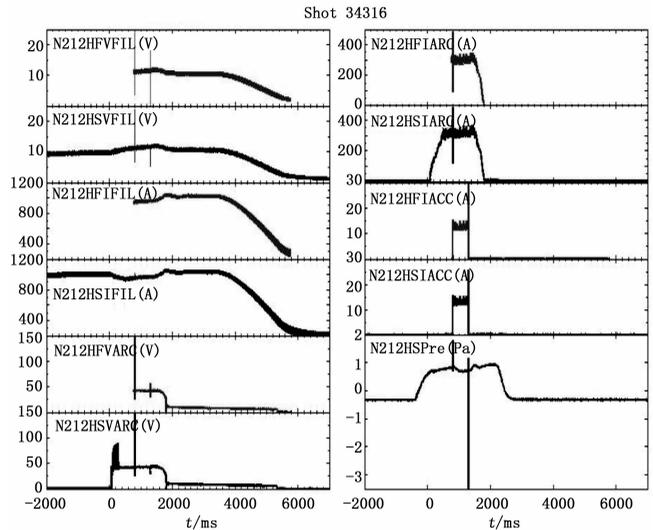


图 8 第 34316 次放电实验电源数据采集放电波形

从图 8 测量结果中可以看出：灯丝预热的本底电流约为 200 A，灯丝设定电流为 1060 A，弧流电流为 320 A，弧压和弧流开始于 74 ms，持续时间将近 1690 ms，打坑深度为 83.5%，引出电流为 14 A，离子源气压压强为 0.78 Pa，与实验目标设定的结果基本保持一致。由于中性束高压的投入，容易出现打火和空间电磁干扰现象，对相关设备造成影响，测量设备采集的灯丝电流和灯丝电压波形在 798.06 ms 处出现尖峰可以清晰看出，由于电源设计本身的不稳定特性，弧流波形上存在纹波也能够明显测量出来。经过多次数据采集测试，系统均能稳定、可靠的运行，该套采集系统较好的满足了中性束高压平台电源系统的数据采集需求，采集系统存储的实验数据格式与 ProDA 软件完全兼容。

### 5 结论

中性束高压平台电源数据采集系统基于 cRIO 嵌入式以太网采集设备，结合 FPGA 和 LabVIEW 编程技术，成功实现了对中性束 2 号束线主要电源的测量和诊断，满足了中性束注入加热的实验需求，为中性束实验人员进一步分析中性束注入加热实验，提供了理论依据和数据基础。在采集设备运行的过程中人机交互界面操作灵活，抗干扰性能强，采集精度高，维护方便。

(下转第 189 页)