

EAST 装置电场数据采集与分析系统

赵海增¹, 季振山¹, 朱崇铭², 王 勇¹

(1 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

2 国网电力科学研究院 实验验证中心, 江苏 南京 210061)

摘 要: 根据 EAST(超导托卡马克装置)实验需求, 为了全面监测 EAST 放电时装置周围的电场变化, 设计了以 LabVIEW 为软件开发平台的多通道 EAST 装置电场数据采集系统, 该系统采用 FlexRIO 系列数据采集板卡进行高速数据采集, 并采用磁盘阵列进行数据存储, 结合虚拟仪器技术与高速数据流盘技术, 实现了 16 个模拟通道同步数据采集、存储与显示, 系统采样精度为 14 位, 采样率可达 25 MHz, 数据流盘速率高达 800 MB/s. 经测试, 该系统性能稳定, 抗干扰性强, 完全满足 EAST 装置周围电场的数据采集需求.

关键词: 电场; 数据采集; LabVIEW; 虚拟仪器; 数据流盘

中图分类号: TP399

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)12-0075-04

The Data Acquisition and Analysis System of The EAST Device Electric Field

ZHAO Hai-zeng¹, JI Zhen-shan¹, ZHU Chong-ming², WANG Yong¹

(1 Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 The Experiment & Verification Center, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210061, China)

Abstract: According to the EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) experiment needs, in order to fully monitoring the changes of the electric field around the EAST device during plasma discharge, a multi-channel data acquisition system of electric field around the EAST device was designed with LabVIEW software development platform. It uses the FlexRIO Series Data acquisition board for high-speed data acquisition, and the disk arrays for data storage. It has the ability of the 16 analog channel synchronous data acquisition, storage and display combined with the virtual instrument technology and high-speed data streaming technology. The system sampling precision is 14 bits, this sampling rate is up to 25MHz, data streaming rates can be 800M / s. By testing, the system is stable, strong anti-interference, and can fully meet the needs of data acquisition of the electric field around the EAST device.

Key words: electric field; data acquisition; LabVIEW; virtual instrument; data streaming

1 引言

EAST(全超导托卡马克)依靠等离子体电流和环形线圈产生的强磁场, 将极高温等离子体状态的聚变物质约束在环形容容器里, 以此来实现聚变反应^[1]. 实验运行时, 多种频段波加热系统、电流驱动

系统、纵场线圈和极向场线圈等将在装置周围产生非常强和复杂的电场环境, 实验中需要对这些电场进行分析, 以便进行有效地控制与屏蔽, 为此电场数据采集与分析系统是必不可少的.

EAST 装置体积庞大, 其周围电场在一次放电(目前最长 411 s)过程中是不断变化的, 因此在实验

收稿日期: 2014-03-01; 修回日期: 2014-04-29

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2012GB105000, 2011GB101000); 中国科学院等离子体物理研究所科学基金(Y35ETY130B)

时要进行连续长时间的数据采集和记录. 现在已经成型的电场测量系统都是传感器和示波器组合的模式^[2], 这种组合就意味着瞬态测量系统不能连续记录在一定时间段内所有的瞬态电场变化(这种模式适用于单通道测量), 而分析 EAST 运行时装置周围的电场特性, 需要知道同一运行时刻, 装置周围不同位置的电场信号. 因此, 针对 EAST 装置周围电场特点, 本文设计 EAST 装置电场数据采集与分析系统, 基于 LabVIEW 和高速数据流盘技术, 实现对 EAST 装置周围电场进行多通道同步数据采集、处理、存储和显示, 为 EAST 装置周围电场某一时间点的全面分析提供方便.

2 系统设计

为了全面监测 EAST 装置周围瞬态变换的电场, 需要多通道同时进行数据采集, 因此有大量的高速数据需要存储, 这在客观上要求数据采集系统必须具备高速数据采集能力和海量数据存储能力, 这也正是高速数据采集系统设计的重点和难点.

本文设计的 EAST 装置电场数据采集系统是一套多通道同步数据采集系统, 采用 NI 最新数据采集硬件设备, 保证系统具有实现多通道高速数据采集和存储的能力, 通过 LabVIEW 软件编程进行控制和进一步数据处理, 软硬件协调实现系统的基本功能. 系统架构图如图 1 所示.

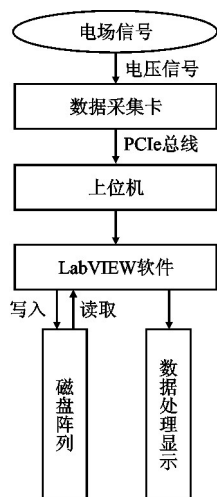


图 1 系统架构图

该系统对现场电场探头输出的电压信号进行采集, 将采集的数据保存在数据采集卡的板上内存中进行缓冲, 通过 PCIe 总线传输给上位机进行存储, 为保证高速数据流盘的速率, 在采集完成之后再进行进一步的数据处理和分析.

3 硬件配置

该系统硬件基于 PXI Express 硬件平台, PXI 系统由三个基本部分组成——机箱、系统控制器和外围模块, 这里外围模块包括数据采集卡和磁盘阵列.

数据采集卡采用 FlexRIO^[3] 系列, FlexRIO 数据采集卡包含两部分, 即 FlexRIO FPGA 模块和数字适配器模块. FlexRIO FPGA 板卡上包含一块 Xilinx Virtex-5 SX95T FPGA 和 512 MB DRAM, 可以实现软件自定义仪器功能. 512 MB DRAM 板上内存可以在高速数据采集中缓存数据, 避免因为数据采集卡 and 上位机速度不协调而导致数据覆盖或丢点. 数字适配器采用 NI 5751 模块, 具有 16 个模拟输入通道和外部时钟输入通道, 支持 30~50 MHz 的外部时钟输入, 14 位的采样精度, 引脚直接与 FlexRIO FPGA 模块相连, 将 AD 采样结果直接传输给 FPGA 板卡做进一步处理.

磁盘阵列^[4]具有 24 TB 的存储容量, 克服了主机存储空间的限制, 800 MB/s 的读写速率, 可以满足多通道大数据量的传输需求.

4 软件设计

本系统利用 NI LabVIEW^[5] 进行编程, LabVIEW 是一个利用图形化编程语言建立虚拟仪器的图形程序设计系统, 也是目前应用最广、发展最快、功能最强的图形化软件开发环境, 被视为一个标准的数据采集和仪器控制软件.

本系统还用到 LabVIEW 的一个子模块 LabVIEW FPGA 模块^[6]. LabVIEW FPGA 模块将 LabVIEW 图形化开发平台扩展到基于 NI 可重配置 I/O(RIO)架构硬件平台上的现场可编程门阵列(FPGA), 通过在 LabVIEW 中进行编程对 FPGA 设备的操作进行配置. LabVIEW 模块流程图将在硬件中得以实现, 可直接控制 FlexRIO 系列数据采集卡的所有 I/O.

系统的软件设计是整个数据采集系统的核心, 也是系统主要组成部分. 本系统软件分为两个部分: 一部分结合 LabVIEW FPGA 子模块设计, 用于数据采集与存储, 另一部分在上位机上开发, 用于数据处理与显示, 其软件架构如图 2 所示.

4.1 数据采集软件设计

此部分软件流程包括两部分, Host 主机程序和 FPGA 程序. Host 程序运行在 PXI 控制器上, 主要

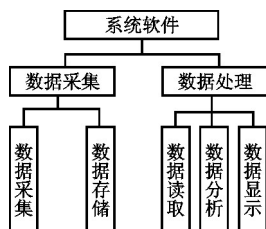


图2 系统软件架构图

负责创建用户界面、提供人机接口、初始化参数设置、对数据进行流盘存储、以及控制采集开始和停止等, Host 程序流程图如图 3(b) 所示; FPGA 程序通过 LabVIEW FPGA 模块编程^[4], 运行在数据采集卡的 FPGA 模块上. 根据 Host 中的参数配置设定触发方式、采样率、参考时钟、缓冲区大小等, 读取通道中的数据, 并写入缓冲区中, FPGA 程序流程图如图 3(a) 所示.

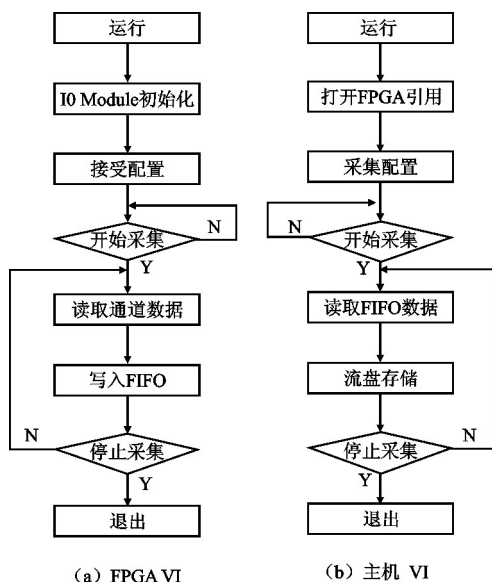


图3 数据采集与存储软件流程图

FPGA 程序和 Host 程序之间通过 FIFO 进行数据传输. FIFO 是一种以其接收到的元素顺序保存元素, 并提供先入先出访问机制的数据架构. 系统开始运行之后, Host 程序通过 FIFO 连续读取 FPGA 中的数据, 并存入高速流盘中.

4.2 数据处理软件设计

由于采样速率太快, 数据量很大, 为保证流盘速度, 采用离线的数据处理方法, 将采集的数据先存入磁盘阵列, 再按照自定义的速率回放数据, 并进行数据处理和显示. 这样就可以很清楚地观察到每个时间点每个通道的具体波形. 数据处理软件流程如图 4 所示.

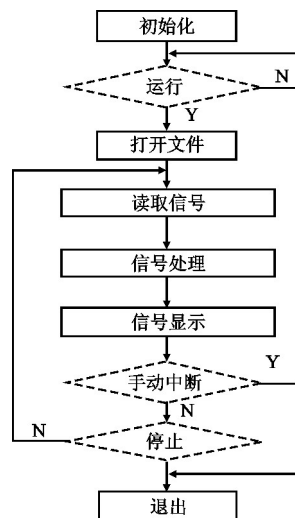


图4 数据处理和显示软件流程图

读取上一步中存储在磁盘阵列中的信号, 信号处理部分将读取的信号进行 FFT, 在频域乘以天线系数^[5], 之后逆 FFT 变换成时域信号, 这一过程将采集到的电场探头输出的电压信号转换为实际的电场信号. 因为不同频率的信号, 天线系数不尽相同, 因此根据给定频点的天线系数, 拟合出整个频域上的天线系数, 在频域将测量电压信号转换成电场信号, 可以提高电压电场信号转换的精度.

信号显示部分有两部分, 一部分用波形图表显示每个通道的数据, 每个通道的显示是独立的, 可以观察到每个通道的电场变化; 另一部分是三维图形显示, 这部分将 16 个通道的数据结合测量时位置信息, 用三维空间的方法显示出来, 可以看到装置周围空间整体的电场分布及强度.

5 仿真测试

在正式用于实验之前, 为了检测该系统的功能性和正确性, 对其进行仿真测试, 针对软件功能, 测试分为两部分, 一部分为 16 通道数据采集和流盘测试, 这部分主要验证系统是否能达到所需的高采样率和高吞吐量, 流盘存储是否会丢点; 另一部分为信号处理和显示, 主要实现一些便于用户分析的功能.

5.1 数据采集和流盘测试

在模拟输入通道 AI0、AI1、AI2 利用信号发生器产生三个信号, 分别为 250 kHz、2V_{pp} 正弦波, 100 kHz、2 V_{pp} 锯齿波, 100 kHz、2V_{pp} 正弦波. 另外 13 个模拟输入通道 AI3~AI15 悬空, 会产生一些很小的随机信号, 幅值几乎为零. 系统采用 50 MHz 板卡时钟, 通过软件分频, 采样率为 25 MHz,

采用内部软件触发模式,触发之后延迟 5 s 进行采集,采样脉宽设置为 10 s,即数据采集时长为 10 s. 设置一个布尔控件,监控 FIFO 是否溢出,如果

FIFO 没有溢出,说明吞吐量能够达到要求,数据没有丢失. 数据采集结果如图 5 所示.

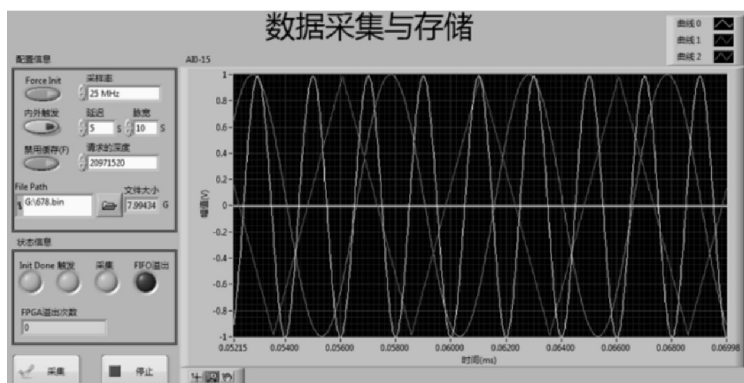


图 5 数据采集测试前面板

由图 5 可知,16 个通道在 25 MHz 的采样率下运行 10 s 产生的数据量理论为 8 GB,而实际文件大小为 7.994 34 GB,采集过程中 FIFO 没有溢出,说明没有丢失数据,而实际文件大小小于理论值,这是由于数据流盘时,每次循环从主机 FIFO 中读取的数据块大小为 N ($N < \text{主机 FIFO 深度}$),存储文件大小为 N 的整数倍,而 10 s 中采集的数据并非 N 的整数倍,因此采集结束时有小于 N 的一部分数据滞留在主机 FIFO 中,因此理论的数据量和实际的文件大小的差值为主机缓存中的数据. 由此可知,该系

统可满足高速数据采集和存储要求.

5.2 信号处理和显示测试

此部分从磁盘阵列中读取上一步采集的数据进行信号处理,在此 FFT 变换点数 N 越大,则频域间隔越小,其中漏掉的频点就越少,变换后的电场波形也越接近实际波形,但是计算机的处理速度和性能就会下降,综合考虑精准度和性能,设置 FFT 点数为 65 535,则 FFT 之后的频域间隔约为 0.38 kHz,数据处理结果如图 6 所示.

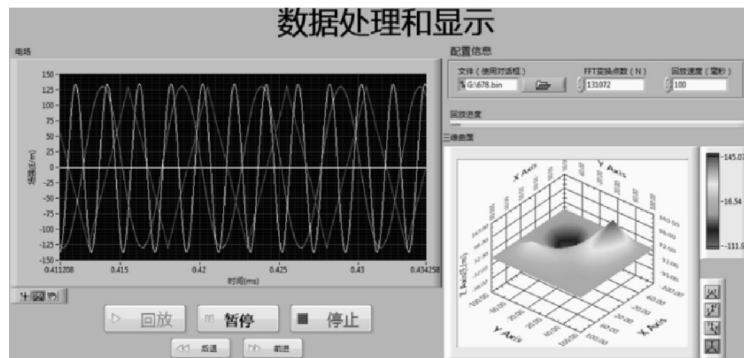


图 6 数据处理和显示测试前面板

电场波形幅值与电压波形幅值的比值为相应频率波形处的天线系数值,三维空间图形将位置信息加入到数据中,利用插值法定性地反应出电场的空间分布和强度,将电场变化趋势直观地反应给实验分析者.

6 结束语

文中采用最新的 NI 高速数据采集卡进行数据采集,配合 LabVIEW 软件编程^[7],使得系统能够实现高速数据采集和存储功能,并在后续完成数据处

理和显示. 经测试,该系统可以实现多通道高速数据采集和分析,界面友好,使用简单,操作方便,稳定性好,并且易于扩展和维护,可用于实验室和工业领域多通道高速数据采集.

参考文献:

- [1] 李建刚. 我国超导托卡马克的现状与发展 [J]. 中国科学院院刊, 2007, 22(5): 374-378.

(下转第 83 页)

析. 方案充分利用了超椭圆曲线安全参数小、实现效率高的优势,在保证签密系统安全性的基础上高效地实现了前向安全的附加性质.

参考文献:

- [1] Zheng Y L. Digital signcryption or how to achieve cost (Signature&Encryption) << Cost (Signature) + Cost (Encryption)[C]// Advances in Cryptology- Crypto'97, LNCS 1294. Berlin: Springer-Verlag, 1997: 165-179.
- [2] 周宣武. 具有附加性质的签密方案及其应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [3] Elsayed Mohamed, Hassan Elkamchouchi. Elliptic curve signcryption with encrypted message authentication and forward secrecy[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2009, 9(1): 395-398.
- [4] Lei F Y, Chen W, Chen K F. Efficient identity based signcryption scheme with public verifiability and forward security[J]. Wuhan University Journal of Natural

Sciences-English Edition, 2005, 10(1): 248-250.

- [5] Hwang Renjunn, Lai Chihhua, Su Fengfu. An efficient signcryption scheme with forward secrecy based on elliptic curve [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 167(2): 870-881.
- [6] 张明武, 杨波, 张文政. 密文匿名的高效前向安全短签密方案 [J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(4): 131-134.
- [7] Zhou Xuanwu. Improved signcryption schemes based on hyper-elliptic curves cryptosystem [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, (20-23): 546-552.

作者简介:

周宣武 男, (1980—), 博士后. 研究方向为密码学与信息安全. E-mail: schwoodchow@163.com.

付燕 女, (1985—), 博士研究生. 研究方向为可信计算.

李欣 男, (1965—), 副教授. 研究方向为网络安全.

刘开华 男, (1956—), 教授, 博士生导师. 研究方向为计算机网络, 软件无线电技术.

金志刚 男, (1973—), 教授, 博士生导师. 研究方向为计算机网络与信息安全.

(上接第 78 页)

- [2] 李鹏程. 瞬态电场测量系统的研制与试验[J]. 电网与清洁能源, 2010(8): 41-44.
- [3] National Instrument. NI FlexRIO FPGA module installation guide and specifications[S]. USA, 2011.
- [4] National Instruments Corporation. 高速数据流盘处理: 编程与标定[EB/OL]. [2008-01-24]. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6458>.
- [5] 龙华伟. LabVIEW 8.2.1 与 DAQ 数据采集[M]. 北京: 清华大学出版社. 2008.
- [6] 彭小平. LabVIEW FPGA 模块在测量控制系统中的开

发流程及特点[J]. 工业控制计算机, 2007, 20(5): 22-23.

- [7] 张宇. 基于 LabVIEW 的多功能数据采集系统的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2013, 34(8): 24-26.

作者简介:

赵海增 女, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为计算机控制与数据采集. E-mail: haizeng@ipp.ac.cn.

季振山 男, (1963-), 研究员, 硕士生导师. 研究方向为计算机控制和数据采集系统.