

NBI 射频离子源探针信号采集系统^①

高洋洋^{1,2}, 胡纯栋¹, 盛鹏¹, 赵远哲¹, 崔庆龙¹, 谢亚红¹, 虞珊^{1,2}, 陈俞钱^{1,2}, 张睿^{1,3}

¹(中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所, 合肥 230031)

²(中国科学院大学, 北京 100049)

³(中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: 中性束注入加热(NBI)是托卡马克(EAST)实验装置中最重要的辅助加热手段之一, 射频离子源是等离子体物理研究所 NBI 系统在研究的关键部件. 为准确地诊断等离子体参数, 本文以 PXI 为平台, 设计了一套射频离子源探针信号采集系统. 硬件部分针对等离子体产生过程中 1MHz 射频干扰问题, 设计了一个 4 阶巴特沃斯低通滤波器. 软件部分以 LabVIEW 作为开发平台, 对探针信号进行实时采集和处理. 处理后的数据在 GUI 界面上显示, 并存储在本地硬盘. 该系统的实现可以有效解决射频离子源测试试验中的干扰问题, 提高获取数据的准确度, 为射频等离子体放电调试提供更为可靠的依据.

关键词: 中性束加热; 朗缪尔探针; 1MHz 射频源; 巴特沃斯; LabVIEW

Signal Acquisition System for Neutral Beam Injector RF Ion Source

GAO Yang-Yang^{1,2}, HU Chun-Dong¹, SHENG Peng¹, ZHAO Yuan-Zhe¹, CUI Qing-Long¹, XIE Ya-Hong¹, YU Shan^{1,2}, CHEN Yu-Qian^{1,2}, ZHANG Rui^{1,3}

¹(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (ASIPP), Hefei 230031, China)

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

³(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Neutral beam injection (NBI) heating is one of the most important auxiliary heating means of Tokamak(EAST) experiment device, and the RF ion source is the crucial part of the research of NBI system in institute of plasma physics. In order to diagnose the plasma parameters accurately, a Langmuir probe signal acquisition system is designed by using PXI as the platform in this paper. In the hardware part, it is mainly aimed at the problem of the interference of the 1MHz RF source in the process of producing plasma, so a 4th-order Butterworth low-pass filter is designed. The software part, which is based on LabVIEW, is designed to acquire and process the probe signal real-timely. The processed data is displayed on the GUI interface and stored on the local hard disk. The implementation of the system can effectively solve the problem of interference in the RF ion source test, improve the accuracy of the data acquisition, and provide a more reliable basis for the RF plasma discharge debugging.

Key words: neutral beam heating; Langmuir probe; 1MHz RF source; butterworth; LabVIEW

EAST 装置是我国自行研制的世界上第一个全超导非圆截面托卡马克核聚变实验装置. 要完成其科学目标, 必须要有高功率电流驱动和辅助加热系统. 由于中性束注入加热^[1,2](NBI)是加热效率最高、物理机制最清楚的一种辅助加热手段, 因此在 EAST 上建立了 4MW 的中性束注入系统. 射频离子源^[4,5]是中性束注

入器中最重要的关键部件, 相对于热阴极灯丝离子源, 射频离子源由于其寿命长、可靠性强、易维护等特点, 因此被用于 EAST-NBI 测试实验中. 等离子体由于射频电源的影响处于一个剧烈变化的电磁环境中, 使得采用探针进行等离子体诊断变得非常困难. 为此我们设计了一套朗缪尔双探针信号采集系统^[3,6], 用于探针

① 基金项目: 国家磁约束核聚变能源研究专项(2013GB101001)

收稿时间: 2015-08-10; 收到修改稿时间: 2015-09-28

信号的采集、处理、显示和存储。

朗缪尔探针信号采集系统(Signal Acquisition System, SAS)具有探针信号实时采集、数据处理和探针信号模拟输出功能。采集通道以差分模式实时采集加在朗缪尔双探针间的扫描电压信号和相应扫描电压下流过探针的电流信号。预留通道可满足将来扩展需要。SAS系统先采用硬件和软件2种方法对采集信号进行滤波处理,然后对处理后的数据进行存储、显示。整个系统的实现不仅可以有效解决采集数据的存储问题,而且提高了系统的抗干扰能力和等离子体参数测量的准确度。

1 系统概述

SAS系统主要包括以下几个部分:朗缪尔双探针、巴特沃斯滤波器、数据采集卡、计算机接口、仪器驱动程序、软件开发平台以及用户界面,其系统结构如图1所示。

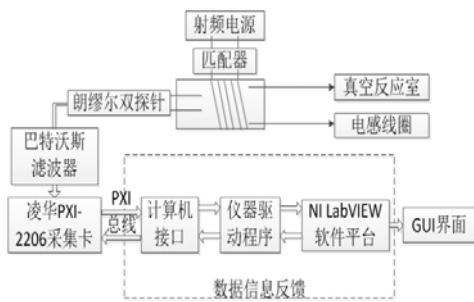


图1 SAS系统结构示意图

SAS系统采用朗缪尔双探针进行测量,双探针法可以有效避免等离子体空间电位的变化对等离子体电子温度测量的影响^[8],提高等离子体电子温度测量的准确度。在双探针间加扫描电压并采集相应扫描电压下流过探针的电流,采集的数据通过4阶巴特沃斯滤波器进行滤波处理;凌华公司生产的PXI-2206采集卡的A/D模块负责把滤波后的模拟信号转换为数字信号;采集卡通过PXI总线与控制器相连,把经过转换的数字信号传递给控制器;仪器驱动模块通过接口实现对硬件模块的控制,实现软件开发平台对硬件的调用,完成对硬件的管理,其中用到的驱动主要有① DAQPilot:面向任务的软件开发工具;② D2K-DASK:支持DAQ-2000系列采集卡的驱动程序;③ WD-DASK:

专为数据采集应用开发提供的高端32/64位内核驱动程序和32位DLL库;④ DAQ-LVIEWPnP:LabVIEW软件驱动程序。软件编程采用NI公司开发的LabVIEW作为开发平台,完成对数字信号的处理。实验人员通过GUI界面和系统进行交互,通过它完成实验中的各项操作。

2 系统硬件设计

SAS系统硬件设计主要包括两部分:滤波器设计和硬件平台设计。

2.1 滤波器设计

在采用朗缪尔双探针进行等离子体诊断时,实际的测量环境中存在着大量干扰,其中最主要的是来自1MHz射频电源干扰。为了有效解决干扰问题,设计了4阶巴特沃斯低通滤波器。设计的一些参数,如表1所示。

表1 滤波器设计参数

截止频率	f_c
$f = 10f_c$ 时,幅度至少衰减80dB	N=4(阶数)
通带电压放大倍数	$A_{uo}=1$

根据巴特沃斯低通滤波器的设计原理,绘制出4阶巴特沃斯低通滤波器原理图,如图2所示。根据巴特沃斯电路的传递函数和归一化表中滤波器函数的分母多项式,建立超系数方程组。

通带内的电压放大倍数:

$$A_{uo} = -\frac{R_1}{R_3} \tag{1}$$

滤波器的截止角频率:

$$2\pi f_c = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_4 R_1 R_4}} \tag{2}$$

品质因数Q与电容关系:

$$Q = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{C_1}{C_4}} \tag{3}$$

由(1)(2)(3)式联立,化解方程组,求得元器件的值,结果如表2所示。

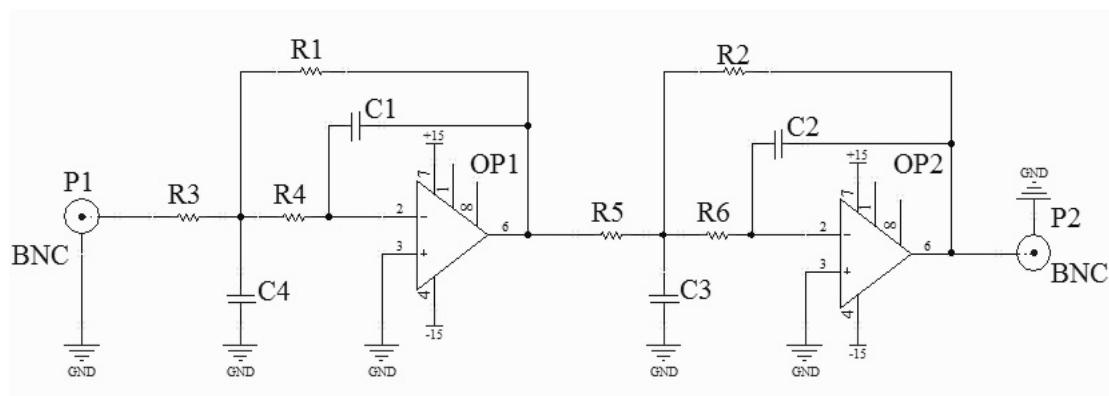


图 2 巴特沃斯低通滤波器原理图

表 2 滤波器元件取值表

	前 2 阶	后 2 阶
品质因数	$Q_1 = 0.54$	$Q_2 = 1.30$
截止频率	$f_1 = 1\text{KHz}$	$f_2 = 1\text{KHz}$
电容	$C_1 = 1.8\text{nF}$ $C_4 = 4.7\text{nF}$	$C_2 = 1\text{nF}$ $C_3 = 15\text{nF}$
电阻	$R_1 = 49.9\text{K}\Omega$ $R_4 = 56\text{K}\Omega$	$R_2 = 36\text{K}\Omega$ $R_6 = 47\text{K}\Omega$

将设计的原理图制成 PCB 板, 为验证其滤波效果, 用信号源和示波器对其进行测试, 结果如图 3 所示。测试时, 采用 1KHz 源信号加上 20KHz 的干扰信号作为输入信号, 如图下方波形所示。上方是滤波后的波形。由图可知, 经过设计的滤波器滤波后, 干扰信号得到有效衰减, 达到了预期的滤波效果。

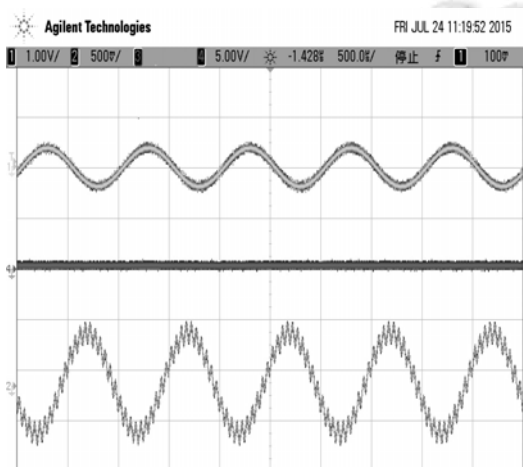


图 3 滤波前后波形图

2.2 硬件平台设计

为了得到相对准确的等离子密度, 需要在真空室的不同位置安放 6 路探针进行信号采集。这就要求系统具有多通道采集的能力, 也要具备存储大量的实验数据的能力。除此之外, 系统其他的需求如下: 12 通道差分、 $\pm 5\text{V}$ 输入单通道 10KS/s 采样率, (0-10)V 单端输出。为了满足实验要求, SAS 系统采用凌华公司生产的 PXI-2200 系列的产品。

1) 采集卡

PXI-HL2206 采集卡有 64 路单端或 32 路差分模拟输入, 16bit 分辨率, 最高 250ks/s 采样率。2 路 12bit 分辨率、1MS/s 更新率的 D/A 输出通道。输入量程范围 $\pm 1.25\text{V}$ 至 $\pm 10\text{V}$, 满足系统需求。

2) 控制器、机箱

凌华公司生产的 PXI-HL3950 控制器, 采用 Inter(R)Core(TM)2 Duo T7500 2.2GHz 处理器, 最大支持 4GB 667MHz DDR2 内存, 集成 160GB 7200RPM SATA 硬盘, 满足系统高速处理、存储数据的要求。PXI-HL2506 机箱, 3U、6 插槽, 其中的 2 个插槽供采集卡和控制器使用, 其余的可供系统扩展。

3 系统软件设计

SAS 系统利用 NI 公司开发的 LabVIEW 进行编程。与传统的编程方式相比, 用它设计虚拟仪器, 可以提高效率 4~10 倍。根据实验需求, SAS 系统应具有以下功能: 数据采集、数据显示、数据处理、数据分析。系统采用模块化设计的思想, 每个功能由一个模块来实现。主要包括系统参数设置、数据采集处理、实验数据存储、数据显示和历史数据回放 5 个模块。

1) 参数设置模块

主要对采样时间、采样率、采样电压最大/最小值、触发有效沿、每个通道采样点等参数进行配置。

2) 数据处理模块

采集数据存储在硬盘前, 首先对采集数据进行处理. 具体的处理流程如图 4 所示. 经过巴特沃斯滤波器滤波后的电压、电流信号经过 PXI-2206 采集卡的 A/D 转换模块后, 变为数字信号存储在电压、电流数组中. 数据处理过程中, 先采用 SG 滤波算法^[7]对其进行滤波处理. (SG 算法优点: ①对原始信号特征改变较少, 求出的电子能力概率函数准确度较高. ②虽然 SG 算法存在数组头尾两端丢弃部分数据的弊端, 但是理论上由郎缪尔双探针测得的 I-V 曲线在左右两端分别达到了离子电流饱和, 数值不变, 刚好避免了这个弊端)经过滤波处理后的数据再根据朗缪尔双探针 I-V 特性曲线求得等离子体参数.

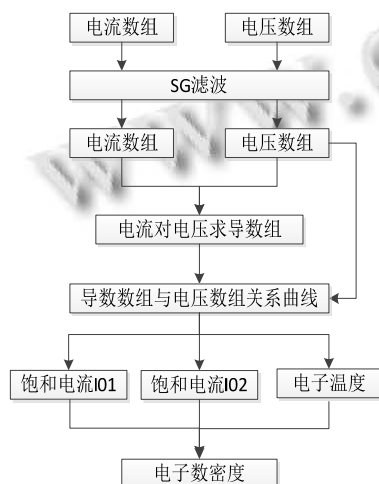


图 4 数据处理框图

3) 数据存储模块

采集过程中, 由于采样率较大, 处理函数来不及处理, 所以 SAS 系统先把采集到的数据读入 FIFO 队列, 存储在一个临时 TDMS 文件中. 待采集完成后, 读出数据进行 SG 滤波处理. 之后, 把处理过的数据以 TDMS 格式存储在本地硬盘以便实验之后物理人员分析. SAS 系统采用 Excel 报表的形式将实验结果保存在本地硬盘, 避免了物理人员实验后大量、繁琐的计算和整理工作.

4) 数据显示

SAS 系统为实验人员提供了良好的人机交互界面. 界面上显示的主要内容有: 电子温度、电子密度、饱和电流、零点导数值等物理参数, 滤波前后的伏安特性曲线、电流对电压求导曲线以及数字处理后的 D/A 输出(0~10V)波形图.

5) 数据回放

SAS 系统提供历史回放功能, 实验人员可通过选择文件路径, 打开保存的文件, 对实验数据进行读取、分析.

3.1 系统流程

SAS 系统主要完成朗缪尔探针信号的滤波处理、多通道数据采集、数据存储、数据显示等功能. 系统具体流程如图 5 所示. 软件启动后, 首先对设备参数进行配置, 满足触发条件后进入采集状态. 由于采样率较高, 处理函数来不及处理采集的数据, 因此先把数据存储在一个临时 TDMS 文件中, 等到采集时间结束、确认采集数据无误后, 读取临时的 TDMS 文件, 把数据分割到相应的通道数组, 然后对数组中的数据进行 SG 滤波处理, 处理后的数据存储在本地的硬盘. 为验证 SG 滤波的效果分别把滤波前、后的数据导入到图形显示函数中以 I-V 曲线形式显示在 GUI 界面上. 然后根据 I-V 特性曲线求出等离子体物理参数. 最后把处理后的数据通过采集卡的 D/A 转换模块输出.

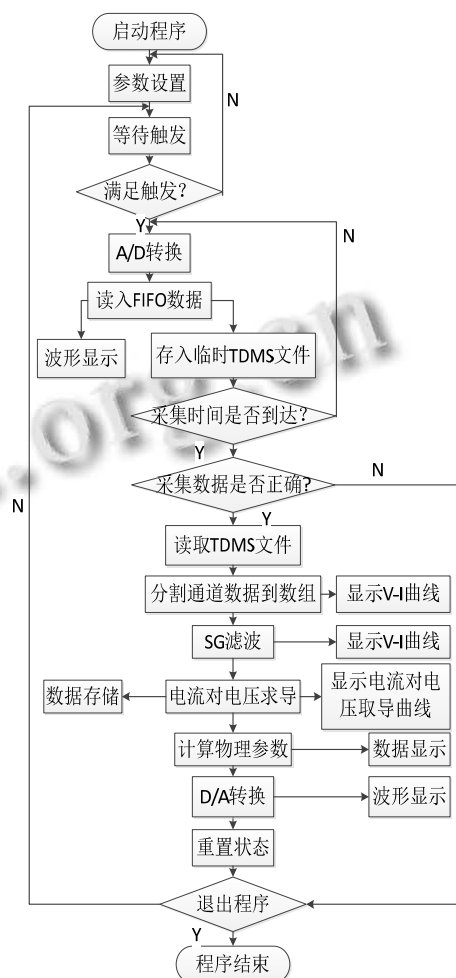


图 5 SAS 系统流程图

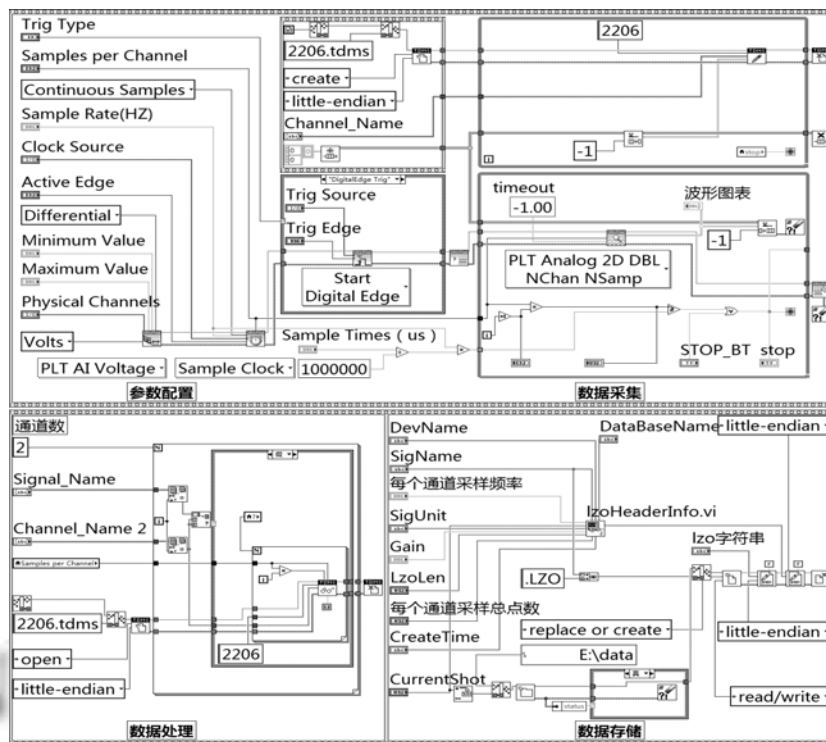


图6 程序核心框图

3.2 核心代码实现

SAS系统采用LabVIEW作为程序开发语言。其VI程序主要由三部分构成：前面板、程序框图、VI图标/连线版。图6是系统的核心程序框图。其中重要的变量定义如下：通道数(N)、每个通道采样数(n)、采样时间(t)、循环次数(Num)和采样率 f_s 。设定的采集时间结束后，系统需要根据这些变量来判断采集数据的完整性。

实际采样数： $n \times N \times \text{Num}$

设置的采样数： $N \times t \times f_s$ (实际 \geq 设置)

SAS采集系统主要由4个部分组成。参数设置部分，主要是设置接入采集设备的通道参数、信号的幅度范围等来初始化系统；数据采集部分是整个系统的核心，通过设置采样率、触发参数、单个通道采样数、触发沿来完成数据采集；数据处理部分将采集到的数据进行滤波、数学计算得到等离子体物理参数，并在GUI界面显示相应结果；数据存储部分负责把数据和实验结果存储在本地硬盘，后续的数据查看、分析以及回显等操作都是在此基础之上实现的。

4 结语

本文介绍了基于NBI射频离子源探针信号采集与处理系统的设计和实现过程。该系统主要有滤波、数据采集、处理和存储等功能，并且具有执行效率高、交互性好、易于跨平台移植和扩展性强等特点。SAS系统的实现可以有效解决NBI射频源测试实验中的干扰问题和探针测量周期长带来的测量误差大的问题，提高了

获取等离子体物理参数的准确度，为NBI射频源放电调试和衡量射频源的性能提供了更为可靠的依据。

参考文献

- Hu CD, Xie YH. NBI team. The development of a megawatt-level high current ion source. *Plasma Science and Technology*, 2012, 14(1): 75-77.
- Hu CD, NBI team. Conceptual design of neutral beam injection system for EAST. *Plasma Science and Technology*, 2012, 14(6): 320-324.
- Xie YH, Hu CD, Liu S, Shong SH, Jiang CC, Liu ZM. Ion source plasma parameters measurement based on Langmuir probe with commercial frequency sweep. *Fusion Engineering and Design*, 2010, 85: 64-68.
- Sheng P, Hu CD, Song SH, Liu ZM, Zhao YZ, Zhang XD, Dou SB. Data processing middleware in a high-powered neutral beam injection control system. *Plasma Science and Technology*, 2013, 6(15).
- 张贤明. 10cm 射频离子源工程设计与初步试验[硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- 龙华伟. LabVIEW 8.2.1 与DAQ数据采集. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- 桑庆双, 程健. S-G 滤波在朗缪尔探针信号处理中的应用. *计算机工程*, 2011, 37(17): 220-222, 226.
- 吴金生. 基于LabVIEW的郎缪尔探针等离子体诊断系统研究[硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2012.