

# 实时反馈控制在离子源放电实验中的应用

盛 鹏 胡纯栋 刘 胜 宋士花 谢亚红

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘要** 本文介绍了一种应用于离子源进气量控制的实时反馈控制系统。系统采用 A/D 模数转换和 D/A 数模转换卡完成系统数字信号处理的输入与输出。系统的控制程序采用 Linux 内核支持的 RTLinux 实时操作系统作为底层操作系统并进行了适当优化裁剪,获得了适合系统控制要求的实时控制程序开发环境,并应用了灵活控制实验中离子源进气量的控制算法。实验首次获得离子源 4.5 s 稳定放电的实验结果。

**关键词** 实时反馈控制, RTLinux, 离子源, 数字信号处理

**中图分类号** TP391.8

中性粒子束注入器(NBI)是涉及超高真空、低温、精密机械制造、高功率电源工程、高功率诊断、测量和控制等领域的前沿技术,是磁约束受控热核聚变等离子体芯部加热和非感应电流驱动基本而有效的手段<sup>[1]</sup>。中性束注入器系统是 HT-7 可控热核聚变实验装置的关键设备,系统中离子源和中性化室(Neutralizer tank,文中简称 Tank)需要一套复杂的充气补气系统<sup>[2]</sup>。离子源产生的高能离子束通过 Tank 气体靶时,发生离子碰撞和俘获而转变为中性高能粒子束。为获得束流强度稳定的高能离子束,须精确控制进入离子源的气体量,使离子源可稳定可靠地起弧放电。本文设计了一套控制离子源放电的实时反馈控制系统(Real-time feedback control system, RFCS)。该系统通过采集朗缪尔静电探针<sup>[3]</sup>反馈的离子饱和流信号,对离子源放电过程中的进气量进行实时调节,从而达到离子源稳定可靠放电的目的。

## 1 硬件组成

工业控制计算机是整个 RFCS 的核心,它是实时反馈控制程序运行的环境。实时反馈控制程序提供了人机交互接口、网络控制接口和现场控制接口。在程序运行过程中,它接收本地控制台和网络发来的控制命令,对实时控制进行实时的修改和设置。当控制程序接收到中性束控制系统(NCS)<sup>[4]</sup>的外部实时控制触发信号时,它就启动实时控制程序以周期为 0.5 ms 进行运行,直到设定的控制时间段结束。

RFCS 主要包括 4 大部分:反馈信号获得与传输、信号处理、控制输出与传输和控制执行部分。其中反馈信号获得与传输部分由朗缪尔探针、采样电路、信号隔离放大电路及 A/D 板卡组成;控制输出与传输部分由 D/A 输出板卡、VF 转换器、光纤和 FV 转换器组成;控制执行部分由气阀电源驱动模块和 PV-10 进气阀门<sup>[5]</sup>组成。它们的具体连接关系如图 1 所示。图中,工业控制计算机与 A/D 卡和 D/A 卡以 PCI 总线连接,实现系统的数据采集、实时控制;朗缪尔探针提供饱和离子流信号;可控阀 PV-10 接受由工控机传来的经过光纤隔离的控制信号。整个系统的组成满足了实时反馈控制的硬件要求。A/D 采集板卡将隔离放大器送来的电压信号转换为数字信号,并存储在计算机内存中。另外它还检测外部触发信号,并把检测结果送给实时控制程序。D/A 输出板卡根据控制需要将数字控制信号转换为模拟信号输出。输出的控制信号经过 V-F 转换成光信号并通过光纤传播来隔离系统高压。光信号传输到 F-V 转换器并转换为电压信号送到离子源高压平台上控制气阀电源驱动模块。气阀电源驱动模块根据控制信号控制 PV-10 阀的开启时间和大小,从而控制离子源放电过程中的进气量。

## 2 控制系统软件设计

控制系统软件由两个程序组成:RTLinux<sup>[6]</sup>实时程序和 Linux 系统服务程序。RTLinux 程序以固定的 500  $\mu$ s 的周期循环执行,实时控制离子源的进气量;在每个周期内,它要完成对实时控制对象参数的数据采集、实时控制计算、控制命令输出,并通

自然科学基金(10575105)资助

第一作者:盛 鹏,男,1979 年出生,现为中国科学院等离子体物理研究所博士研究生,研究方向为数据采集与控制系统

收稿日期:2006-11-07,修回日期:2007-03-27

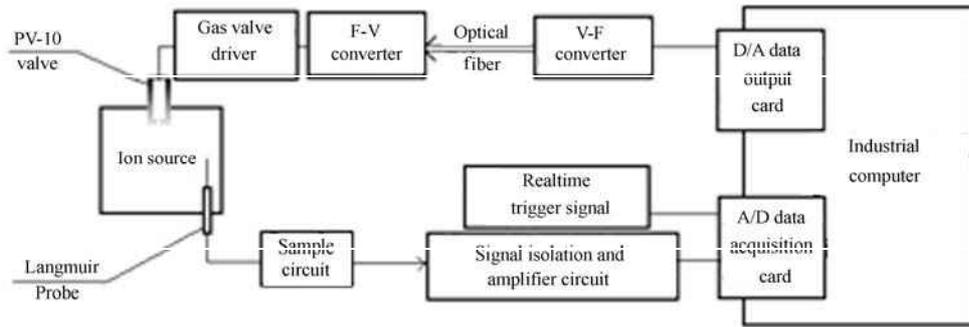


图 1 实时反馈控制系统硬件连接示意图

Fig.1 Schematic of connections of the RFCS hardware

过实时的先入先出队列 (RT-FIFO) 将数据传输给 Linux 服务程序。Linux 服务程序主要完成存储 RTLinux 程序传来的数据、与服务器的网络通讯以及实现本地用户命令接口等功能。

RTLinux 程序是实时控制系统的核心，其工作流程如图 2 所示。系统启动时，RTLinux 程序开始运行。程序首先加载历史参数设置，并用这些参数初始化 A/D 采集板卡和 D/A 输出板卡。完成硬件初始化后，程序设置实时调度参数并启动实时进程，使控制系统进入实时控制主循环。在一个实时控制周期内，程序首先检查是否收到用户命令，如收到用户命令，则进行命令解释。接收到程序结束命令，RTLinux 程序就保存参数设置、释放板卡资源并结束程序运行；当接收到改变程序参数命令，程序就

更新参数设置以使命令生效。如本周期无用户命令，

则程序直接启动 A/D 采集输入，读取采集数据并与设定的参数进行控制计算，把计算结果通过 D/A 控制板卡输出到执行模块。完成控制任务后，RTLinux 程序将采集的参数和控制输出结果保存到 RT-FIFO，以便使 Linux 程序向用户显示和保存数据到数据服务器。然后程序等待直至本次实时控制结束。

Linux 服务程序是用户与实时控制系统进行交互操作的接口程序。它可以完成本地用户和网络用户的控制命令，并且将数据存储到远程数据服务器上，以便进行数据备份与共享。图 3 是 Linux 程序工作流程图。Linux 程序启动后，它对环境变量初

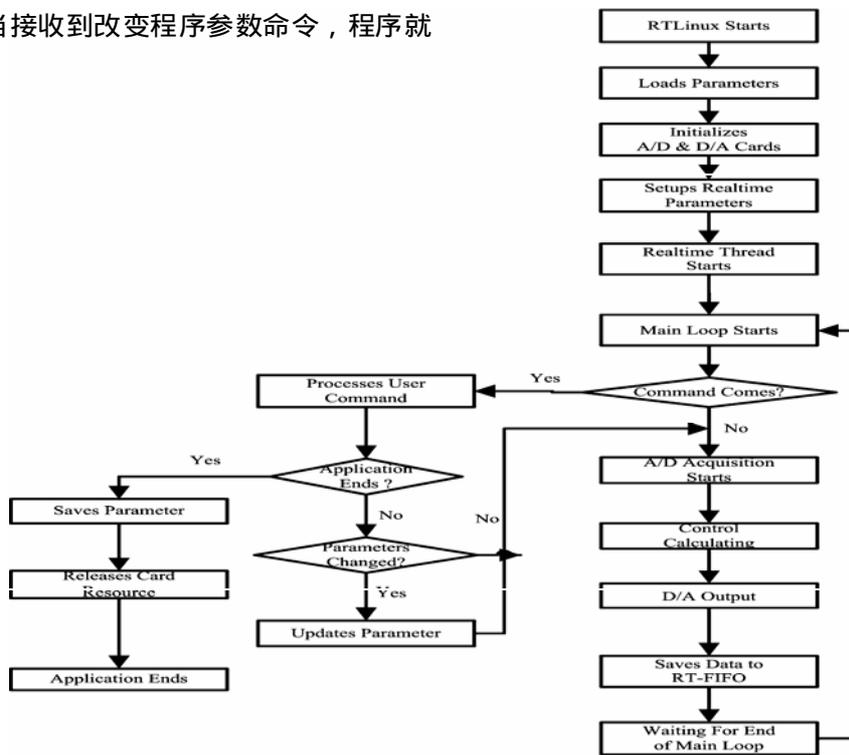


图 2 RTLinux 程序工作流程图

Fig.2 Flow chart of the RTLinux application

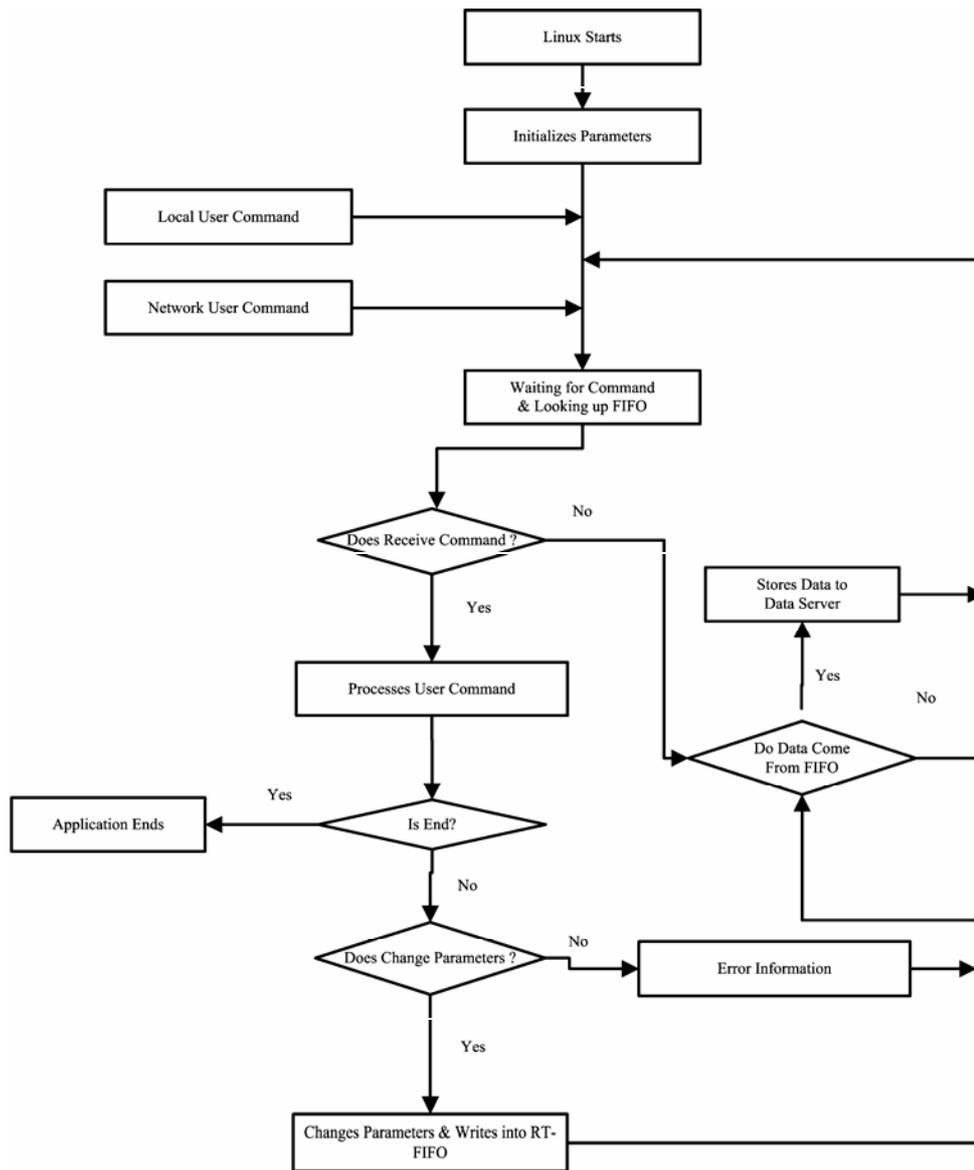


图 3 Linux 程序工作流程图  
Fig.3 Flow chart of the Linux application

始化后就等待用户命令并检查 RT-FIFO 中是否有数据存在。当网络用户或本地用户输入命令后，程序就处理用户命令并进行命令解释。如果是程序结束命令，则程序结束；如果是更改参数设置命令，则程序将更改参数写入到 RT-FIFO 通知 RTLinux 程序；如果是其他命令，则程序出现错误命令提示。如果 RT-FIFO 中存在数据，则程序将保存数据到数据服务器备份；如果 RT-FIFO 中没有数据或者数据保存完毕，则程序进入等待状态。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实时控制系统分析

在其它实验参数保持不变的情况下，为了使离子源放电更加平稳并且保持时间长，本实时控制系

统将根据朗缪尔探针反馈的饱和离子流信号对进气量进行实时调节。系统的实时控制周期选择在 1 毫秒内，这是考虑到以下两个方面的原因而做出的选择：一方面离子源放电时弧流变化比较剧烈，能在 1 毫秒内改变几百安培；另一方面 PV-10 进气阀门的开大与关小转换存在迟滞性，即给出进气量变化到阀门实际开启或关闭至目标开度所用时间，此延时时间约在毫秒量级上。

图 4 是系统空闲时的实时控制的 D/A 板卡输出的控制电压输出曲线。由图可见，实验中输出的电压幅度为 0—10 V，实时控制周期是 500 μs，系统空闲时程序运行的负荷时间是 30 μs。图 5 是系统处于工作时 D/A 板卡输出的控制电压输出曲线。图中的幅值可在 0—10 V 变化，实时控制周期是 500 μs，系统工作时程序的运行负荷时间是 180 μs。通过图

4 和图 5 可以看出,系统控制工作时其所用时间不超过  $200\ \mu\text{s}$ ,这远远低于实验要求的毫秒量级控制,完全符合实验控制要求。

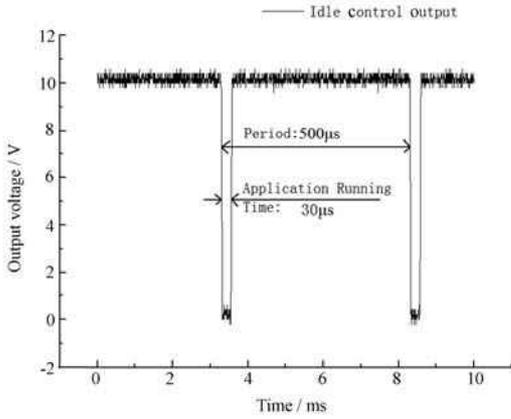
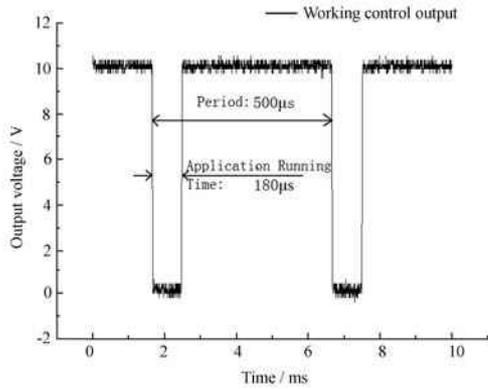


图 4 系统空闲时输出电压曲线  
Fig.4 Waveform of control output voltage when the system is idle



5 系统工作时输出电压曲线  
Fig.5 Waveform of control output voltage when the system is running

### 3.2 离子源放电结果分析

实验采用的离子源是 22 cm 的双潘宁离子源。在离子源放电过程中,以分布控制系统中的 PLC 发来的实验开始触发信号为放电弧流采集的时间轴零点,以 PLC 发给进气系统的触发信号<sup>[7]</sup>为进气时间轴零点。

图 6 是采用实时反馈控制下 60251 炮与开环控制下 60135 炮的离子源放电过程中系统进气控制输出电压曲线和饱和离子流曲线比较图。图中,曲线 A、B 是输出电压, C、D 是饱和离子流电压信号。其 A、C 数据来自开环控制 60135 炮; B、D 来自实时反馈控制 60251 炮。图 7 是这两炮实验所采集的离子源放电弧流波形比较图。图中,曲线 A 是开环控制 60135 炮下获得的弧电流波形; B 是实时反馈控制 60251 炮下获得的弧电流波形。在实验过程中,离子源放电约开始于 790 ms 处,而进气比放电

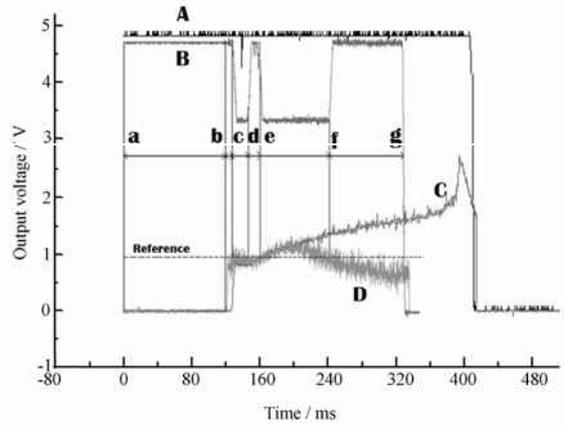


图 6 实时反馈控制与未采用实时反馈控制下饱和离子流曲线比较  
Fig.6 Waveform of ion current signals of the system controlled by the RFCS, in comparison to the system with non-RFCS control

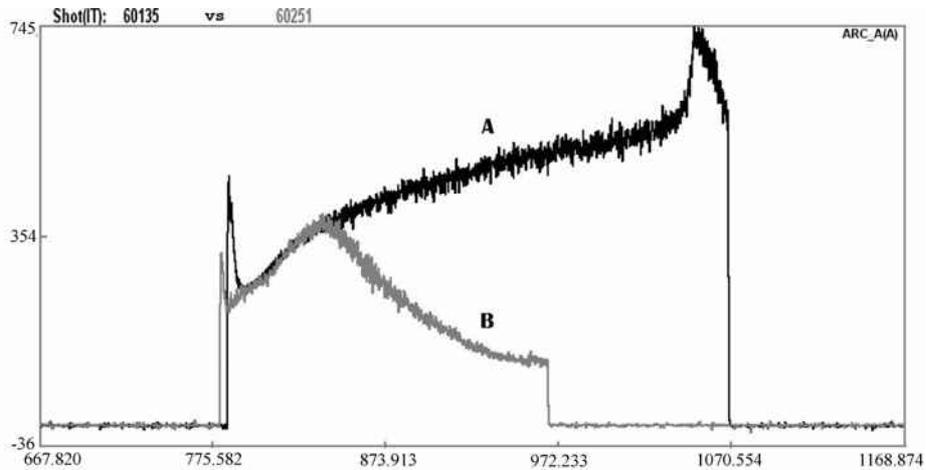


图 7 实时反馈控制与未采用实时反馈控制下的离子源放电弧流波形比较  
Fig.7 Waveform of arc current of the ion source controlled by the RFCS, in comparison to non-RFCS control

开始时间提前 150 ms。从图 6 中曲线 A 可以看出，进气控制电压保持恒定值，即进气量在放电过程中保持恒定值。由饱和离子流曲线 C 可以看出放电过程中离子流慢慢爬升，在最后阶段迅速爬升直至引起电源过流保护，从而使系统切掉电源终止离子源放电。由图 7 两炮的弧电流曲线比较图可以明显看出，弧流在采用实时反馈控制后离子源放电尾部上翘的趋势被遏制。在离子源放电过程中，弧流在经过一个上升过程后被反馈控制调节后逐渐下降，同时进气调节使实验系统不再引起电源过流保护，从而可以得到长时间和稳定的离子源放电。

图 6 中 60251 炮可反映实时反馈控制的控制算法的详细工作过程。图中虚线 Reference 是实验过程中设定的控制参考线；曲线 B 是系统控制输出电压，曲线 C 是系统采集获得的饱和离子流电压信号。在实验过程中为了保证阀门正常工作并在实时控制过程中阀门不关闭，控制系统对进气控制电压规定了最大进气电压和最小进气电压。实时反馈控制算法通过以下步骤对离子源进气量进行实时调节：

(1) 接到进气触发信号后，系统进行从 a 点到 b 点的约 120 ms 以最大进气电压控制的预充气，此过程可保证离子源顺利起弧。

(2) 从 b 点开始进入实时反馈控制。由朗缪尔探针采集到的饱和离子流信号可以看出放电弧流逐渐变大，但还未到达参考线，因此系统维持最大的进气电压充气。

(3) 从 c 点开始放电弧流将超过参考线，则反馈控制系统控制进气系统慢慢减少进气控制电压直到最小进气电压。由于此过程饱和离子流居于参考线之上，所以进气维持在最小进气电压。

(4) 从 d 点开始饱和离子流低于参考值，则控制输出开始慢慢上升，直到输出升到最大输出，导致饱和并维持最大进气电压。

以后的控制过程与 (2) 到 (4) 步的控制过程类似。

经上述控制算法的控制，系统就可以根据饱和离子流的反馈对离子源的进气量进行实时灵活地调整，以达到控制离子源放电弧流趋于稳定的目的。在实时反馈控制系统控制下获得了 4.5 s 离子源稳定放电弧流波形，这是目前该离子源运行过程中放电时间最长的一次。

## 4 结论

本实时反馈控制系统设计具有以下特点：在硬件上对信号采用放大与隔离，控制输出信号与高压

控制电源采用光信号以光纤隔离，使系统不受实验中高压电源的冲击，保护了系统；在信号转换上对信号的输入采用 A/D 采集板卡进行模数转换，对输出控制信号采用 D/A 采集板卡进行数模转换，这样简化了系统设计复杂性并提高了系统的可靠性；在控制软件设计与开发上，采用 Linux 标准内核，同时采用 RTLinux 实时内核并对内核进行修改，裁减出最适合离子源放电实验控制要求的实时开发环境并设计了实时控制算法，从而保证了实时控制程序的顺利开发。

实验结果表明，该实时反馈控制系统很好的满足了对进气量调节的实时性要求，满足了离子源放电弧流平稳控制的要求。实验获得了 4.5 s 长脉冲离子源平稳放电弧流波形，这与不采用实时反馈控制的实验中获得放电弧流的时间只有 500 ms 相比，此次实验取得了重大成功。该系统的成功对其它实时性控制要求较高的控制系统开发和设计提供了借鉴与参考。

## 参考文献

- 1 石秉人. 磁约束聚变原理与实践. 北京: 原子能出版社, 1999. 192—197  
SHI Bingren. Magnetic confine fusion principles and practice. Beijing: Nuclear Publishing House, 1999. 192—197
- 2 刘智民, 刘小宁, 陈联, 宋士花, 等. 真空科学与技术学报, 2004, 24(5): 355—358  
LIU Zhimin, LIU Xiaoning, CHEN Lian, SONG Shihua, et al. Vacuum sci technol, 2004, 24(5): 355—358
- 3 陈开云, 胡纯栋, 刘胜, 等. 核电子学与探测技术, 2006, 26(4): 517—520  
CHEN Kaiyun, HU Chundong, LIU Sheng, et al. Nucl Electron Detect Technol. 2006, 26(4): 517—520
- 4 WANG Yongjun, HU Chundong, LIU Zhimin, et al. Plasma Sci Technol. 2005, 7(3): 2822—2824
- 5 陈联, 刘智民, 朱武, 等. 真空, 2003,(6): 34—36  
CHEN Lian, LIU Zhimin, ZHU Wu, et al. Vacuum, 2003,(6): 34—36
- 6 G. Sudha Anil Kumar. Using PowerDAQ for Data Acquisition Applications in RTLinux. <http://www.fslabs.com>.
- 7 宋士花, 刘智民, 刘胜, 等. 核电子学与探测技术, 2005, 25(6): 122—125  
SONG Shihua, LIU Zhimin, LIU Sheng, et al. Nucl Electron Detect Technol. 2005, 25(6): 122—125

## Application of real-time feedback control in ion source discharging

SHENG Peng HU Chundong LIU Sheng SONG Shihua XIE Yahong

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

**Abstract** A real-time feedback control system (RFCS) which is applied to control the gas supply of the ion source is introduced in this paper. The system consists of an A/D data acquisition card and a D/A output card, which are used as the data input and control output of the digital signal processing system. RTLinux OS which is compatible with the Linux kernel is adopted by the control application. The RTLinux is also optimized to reduce the size and provides good program developing environments and fulfills the control requirements. A flexible control algorithm is introduced to control the gas supply of the ion source. By the RFCS application, the experiment has firstly got the longest pulse by far: a stable discharging of the ion source lasting for 4.5s.

**Key words** Real-time feedback control, RTLinux, Ion source, Digital signal processing

CLC TP391.8