



核科学与工程

# 基于射频功率调节的负离子源束流反馈控制研究

舒先来<sup>1,2</sup>, 刘智民<sup>1,2</sup>, 谢亚红<sup>1,2</sup>, 王娜<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1</sup>,  
韦江龙<sup>1</sup>, 崔庆龙<sup>1</sup>, 潘军军<sup>1</sup>, 陈世勇<sup>1</sup>, 胡纯栋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

**摘要:** 基于射频负离子源的中性束注入系统是高功率长脉冲(稳态)运行中性束注入系统的最佳选择。负离子源是中性束注入系统的核心部件, 需要实现稳定的负离子束引出和加速。在负离子源的运行过程中引出负离子电流会发生变化, 尤其在长脉冲、高能量运行条件下会更加明显, 因此无法满足稳定运行的要求。为了实现引出束流的稳定引出, 开展了束流反馈控制研究, 研发了一套基于射频功率调节的束流反馈控制系统, 并将束流反馈控制系统应用在射频负离子源测试平台, 开展了束流反馈控制测试。测试结果表明束流反馈控制系统能够实现对束流的实时反馈调节以获得束流的稳定引出, 验证了基于射频功率调节的束流反馈控制的可行性, 为高功率射频负离子源的研制提供支持。

**关键词:** 中性束注入; 射频负离子源; 长脉冲; 稳定输出; 反馈控制

中图分类号: TL67 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220098

## Research on beam feedback control of negative ion source based on RF power regulation

Shu Xianlai<sup>1,2</sup>, Liu Zhimin<sup>1,2</sup>, Xie Yahong<sup>1,2</sup>, Wang Na<sup>1,2</sup>, Liu Wei<sup>1</sup>,  
Wei Jianglong<sup>1</sup>, Cui Qinglong<sup>1</sup>, Pan Junjun<sup>1</sup>, Chen Shiyong<sup>1</sup>, Hu Chundong<sup>1,2</sup>

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Neutral beam injection systems based on RF negative ion sources are the best choice for high power long pulse (steady-state) operation of neutral beam injection systems. The negative ion source is the core component of the neutral beam injection system, which needs to achieve stable negative ion beam extraction and acceleration. During the operation of the negative ion source, the negative ion current will change, especially under long-pulse and high-energy operating conditions, so it cannot meet the requirements of stable operation. To achieve a stable extraction of the extracted beam, the research on beam feedback control was carried out and a beam feedback control system based on RF power adjustment was developed. The beam feedback control system has been applied in the RF negative ion source test platform. The test results show that the beam feedback control system can realize real-time feedback adjustment of the beam to obtain stable extraction of the beam. Beam feedback control based on RF power regulation is feasible, which provides support for the development of high-power RF negative ion sources.

**Key words:** neutral beam injection, RF negative ion source, long pulse, stable output, feedback control

中性束注入(NBI)是聚变等离子体加热和电流驱动的有效方法,是实现聚变堆点火和燃烧等离子体控制的必备手段之一<sup>[1-3]</sup>。从离子束中性化过程的效率以及整个系统的经济性方面考虑,当要求的束能量超过 50 keV/amu (amu, 原子质量单位)时一般考虑采用基于负离子源的中性束注入系统<sup>[4-5]</sup>。为了开展负离子源的关键技术研究和性能测试,国际上先后建立了多个负离子源测试平台用于开展负离子源的关键物理和技术问题研究<sup>[6-7]</sup>。中国科学院等离子体物理研究所从 2017 年也开始了对射频(RF)负离子源的研制<sup>[8-11]</sup>。

\* 收稿日期: 2022-04-06; 修订日期: 2022-08-03

基金项目: 国家重大科技基础设施建设项目(2018-000052-73-01-001228); 国家自然科学基金项目(11975261)

联系方式: 舒先来, milkshu@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 谢亚红, xieyh@ipp.ac.cn。

在射频负离子源测试平台的运行实验中,研究者发现了负离子流大小随着束引出进程发生变化的现象<sup>[12-13]</sup>。造成该现象的原因主要分为两类:一是由于电源负载发生变化,导致电源的输出电压发生变化,此时会直接导致束流呈现一个小的阶梯式变化;二是随着束引出过程的进行,影响束流生成的因素发生了缓慢的变化,比如等离子体电极(PG)温度在束引出过程中出现的温升会导致束流呈现连续且缓慢的增长,在长脉冲、高能量运行条件下会更加明显。随着中性束注入系统的发展,对中性束注入系统性能提出了更高的要求,稳定的中性束是NBI装置进行功率注入的最佳选择,因此实现负离子流的稳定引出非常重要。

射频负离子源实现束引出分别需要经过等离子体产生、负离子产生以及负离子束引出三个阶段,其中等离子体产生指的是气体放电形成等离子体,影响该过程的主要因素有射频功率和进气量;负离子产生主要指的是向扩展室注入铯,以此来改变PG电极表面逸出功,提高氢负离子产额,影响该过程的主要因素为铯注入量和PG温度;负离子束引出阶段需要利用静电场将负离子引出并加速,影响该过程的主要因素有偏置电压、引出电压以及加速电压等。

在离子源运行过程中,可以改变射频功率、进气量、PG温度、偏置电压、引出电压、加速电压中任意一个变量来影响引出束流,但是反馈控制量需要满足较好的实时性和灵敏度,所以并不是所有的变量都适用于反馈控制。首先对PG温度的控制存在一定的延时不利于实时反馈;其次对进气量的控制会影响离子源的真空,进而影响负离子的稳定运行;最后在测试平台上开展了一系列的实验研究,表明偏置电压、加速电压对束流的调节作用有限,而束流对射频功率和引出电压的变化较为敏感。考虑到引出电压的增加会增加电极间打火的概率,同时也增加了电极的热负荷,因此对引出电压的调节不利于离子源的稳态运行。综上所述,基于射频功率调节的束流反馈控制是实现束流稳定输出的较佳手段。

## 1 束流反馈控制系统功能需求分析

射频负离子源主控系统是一个分布式控制系统,主要负责对各个子系统的时序控制和状态监控。束流反馈控制系统作为负离子源的一个子系统,主要用于离子源射频功率的输出控制,其工作时序需要由主控系统给定,实现各子系统间的协同工作<sup>[14]</sup>。

### 1.1 射频功率源的基本运行控制模式

在等离子体建立的初始时刻,负载的等效阻抗会发生变化,此时会存在很大的反射功率,影响射频功率源的稳定运行,因此需要采用功率爬坡输出的方式适应在等离子体激发时反射功率过大的暂态过程<sup>[15]</sup>。要求在放电过程中首先维持一段较小的射频功率用来激发等离子体,再上升到所需要的射频功率,因此射频功率源的基本运行包括五个阶段:爬坡1( $t_0-t_1$ )、平顶1( $t_1-t_2$ )、爬坡2( $t_2-t_3$ )、平顶2( $t_3-t_4$ )、缓降( $t_4-t_5$ )。图1为射频功率源的功率爬坡控制方法示意图。

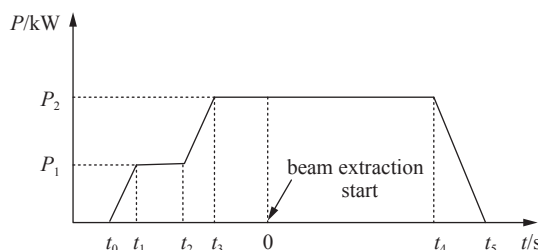


Fig. 1 Schematic diagram of power ramp control method

图1 功率爬坡控制方法示意图

束流反馈控制系统和主控系统之间通过以太网实现功率爬坡参数的传递,束流反馈控制系统作为传输控制协议(TCP)服务器端保持监听状态,每次放电由主控系统作为TCP客户端发起会话请求建立连接,将功率爬坡参数以字符串指令的形式发送至束流反馈控制系统。束流反馈控制系统对来自主控系统的指令串进行解析后,得到6个时间节点 $t_0-t_5$ 以及2个功率阶梯 $P_1$ 和 $P_2$ ,主控系统定义开始进行束引出的时间节点为0时刻,对时间节点参数的设置也是以0时刻作为参照点,所以 $t_0-t_5$ 依次增大且前4个值为负值,至此束流反馈控制系统的功率输出时序得以确认,还需要通过信号的同步触发作用使系统的时间基准和主控系统保持一致。

使能信号作为功率输出的封锁信号,只有功率源使能信号解锁时,射频功率源才会根据输出的控制信号输出射频功率,使能信号由主控系统给出,在功率源开始功率爬坡时即 $t_0$ 时刻同步释放,在放电时序结束时重新进入封锁状态。可以利用使能信号的触发实现同主控系统时间基准的一致,由于触发发生在 $t_0$ 时刻,时序的相关时间节点由原来的以0时刻作为参照点转变为以 $t_0$ 时刻作为参照点。

### 1.2 束流反馈控制功能

束流反馈控制以负离子电流的大小作为反馈量,通过控制射频功率的输出来实现负离子流的稳定输出。在功率爬坡时序中,束流反馈控制功能实现于 $0-t_4$ 期间,依次经过控制目标采集和束流反馈控制两个阶段,在此期间

需要一直对束流进行采集,在控制目标采集阶段束流采集用于确定控制目标,在该阶段束流采集的周期和“采样段”的长度有关;在束流反馈控制阶段束流采集作为反馈控制的反馈量,在该阶段束流采集的周期和闭环反馈的周期有关。反馈控制基于增量式 PID(比例-积分-微分)算法实现, PID 的基本规律可以表示为

$$U(t) = K_p(\delta_{\text{err}}(t) + \frac{1}{T_i} \int \delta_{\text{err}}(t) + \frac{T_d d\delta_{\text{err}}(t)}{dt}) \quad (1)$$

其中:  $K_p$  为比例增益,  $T_i$  为积分时间常数,  $T_d$  为微分时间常数,  $\delta_{\text{err}}(t)$  为当前偏差。在控制器中实现的 PID 算法是经过离散化的, 设系统采样周期为  $T$ , 离散 PID 算法增量形式为

$$U(k) = U(k-1) + \Delta U(k) \quad (2)$$

$$\Delta U(k) = K_p[\delta_{\text{err}}(k) - \delta_{\text{err}}(k-1)] + K_i \delta_{\text{err}}(k) + K_d[\delta_{\text{err}}(k) - 2\delta_{\text{err}}(k-1) + \delta_{\text{err}}(k-2)] \quad (3)$$

式中:  $K_i = T/T_i$ ,  $K_d = T_d/T$ 。由于负离子束流对变量的响应存在着 ms 量级的延迟, 过快的控制周期会导致在单位时间产生更多的算法迭代次数, 从而产生超调造成束流的波动, 因此闭环控制的周期作为系统调试的主要参数之一。此外, 为了实现束流反馈功能和保证离子源的稳定运行, 还需要对以下问题进行分析。

### (1) 控制目标采集

由于负离子源引出束流的大小受到多种因素的影响, 不同参数下所对应的稳态负离子流大小无法提前预知, 即对于反馈控制而言缺少目标量, 因此在进行闭环反馈之前, 需要利用控制目标采集算法采集当前参数下对应的稳态负离子流大小作为反馈控制的目标量。

为了防止束流的抖动对控制目标采集造成误差, 控制目标采集算法不依靠对某一个点进行采集, 而是考量束流在某一时间区间内的稳定性。通过引入容量为 5 的采集队列, 每 20 ms 对束流进行一次采集并更新采集队列, 由于采集队列的容量固定, 当存入采集值的数量超过 5 时, 需要弹出一个采集值才能存入新的采集值, 根据队列的先进先出特性, 此时会优先弹出最先存入的值, 因此采集队列一直储存最近 100 ms 内的采集值。由于采集队列一直随时间往前推移, 所以该方法能够使采样段自动的跳过束流抖动段, 直到束流在采样段内基本平稳为止。如果束流能尽可能地稳定, 采集队列的方差应当是一个趋近于 0 的值, 当方差小于设定阈值, 可以认为束流在过去 100 ms 的时间趋近稳定, 此时可以将采集队列的平均值作为束流控制的目标量, 并且在完成对控制目标的采集后退出控制目标采集程序, 进入束流反馈阶段。

### (2) 打火再起处理

强流离子源在高能量和长脉冲运行过程中一般采用打火再起的自调整技术。目前该技术已经应用于 EAST-NBI 的强流离子源, 在发生打火时, 会迅速地切断电源并在几十 ms 后恢复束流引出<sup>[16]</sup>。基于负离子源的打火再起技术原理相同: 发生打火时, 触发连锁保护迅速切断引出电源和加速电源以保护离子源, 并在一定时间后重新投入, 在这期间需要维持射频功率的输出用以维持等离子体产生, 否则无法通过重新投入引出电源和加速电源的方式重新建立束流。同时对束流反馈控制系统来说, 当发生电极打火后由于切断了电源, 引出的负离子电流会立即下降到极低的水平, 射频源会在闭环反馈的作用下输出最大功率, 因此在发生打火后, 必须避免闭环反馈对射频源输出功率的调节。

图 2 为根据打火信号进行开环/闭环切换原理图。打火信号是连锁保护系统针对打火产生的状态信号, 束流反馈控制系统可根据该信号控制功率输出在开环状态或闭环状态。在发生打火后立即退出反馈控制, 并保持当前的射频功率输出, 直到打火状态复位并且电源就位, 系统将重新进入到反馈调节。

### (3) 功率调节限幅

当束流偏离目标值较大或发生异常情况时, 束流反馈控制系统会试图通过不断调节射频功率来恢复束流, 此时射频功率会在算法迭代增量的作用下持续变化直至满量程输出亦或是停止输出, 从而造成运行参数不匹配, 轻则导致离子源运行停止, 重则造成设备的损坏。

通过对反馈控制进行调节幅度限制可以避免输出功率的过调。调节幅度限制是指对射频功率的反馈调节只

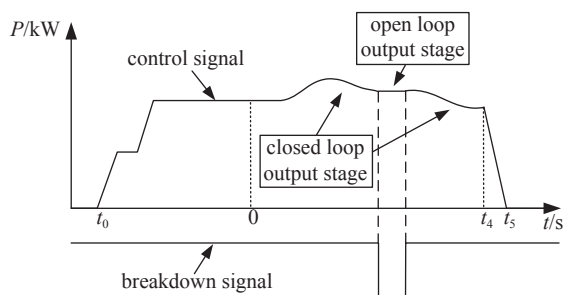


Fig. 2 Schematic diagram of open-loop/closed-loop control switching according to breakdown signal

图 2 根据打火信号进行开环/闭环控制切换原理图

能在设定功率上下一定范围内进行,以此保证射频负离子源的稳定运行。功率调节限幅参数作为功率调节的阈值需要在实验中进行调试;在开始调试的时赋予一个较小参数,当发现对射频功率的调节达到其界限并且还不足以使得束流回归稳态值时候可以适当放宽该参数。在目前的测试实验中,将功率调节限幅设置为设定值上下20%是能获得较好的控制效果,预测随着后续开展更高功率、更长时间的长脉冲运行实验,该参数会根据实验运行情况被进一步放宽。同时,实验也发现在负离子源稳定运行期间,束流的变动一般是有限的,因此对于束流产生特别大的突变时,采取保持原功率输出的保守策略。

## 2 束流反馈控制系统设计与测试

### 2.1 束流反馈控制系统设计

基于对束流反馈控制系统功能需求分析,完成了相关硬件设计,其硬件结构如图3所示。核心控制板主要由控制器、以太网电路、光耦触发电路、信号处理单元构成,其中控制器采用STM32F103RBT6作为束流反馈控制系统的控制核心,完成相关算法实现以及逻辑输出;以太网电路是以集成全硬件TCP/IP协议栈的W5500芯片为核心的功能电路,用于束流反馈控制系统和主控系统之间传递放电参数;光耦触发电路建立主控系统和控制器间的可靠触发连接,由光电传感器将光信号转换为TTL电平信号,并且为了匹配控制器3.3V的电压域,利用NPN三极管实现电平转换;信号处理单元负责对输入和输出的模拟信号进行处理,主要涉及对信号的阻抗匹配以及电压域匹配。

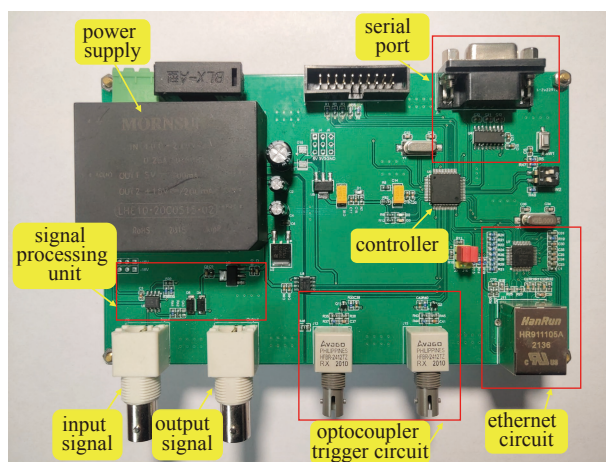


Fig. 3 Hardware structure of the beam feedback control system

图3 束流反馈控制系统硬件结构

在单次束流引出过程中,束流反馈控制系统主要工作流程如图4所示,束流反馈控制系统首先需要接收来自主控系统的参数指令得到功率爬坡时序,接着按照时序进行功率爬坡输出或者束流反馈输出,当时序输出结束后,束流反馈控制系统将进行状态复位等待新一轮的束流引出。

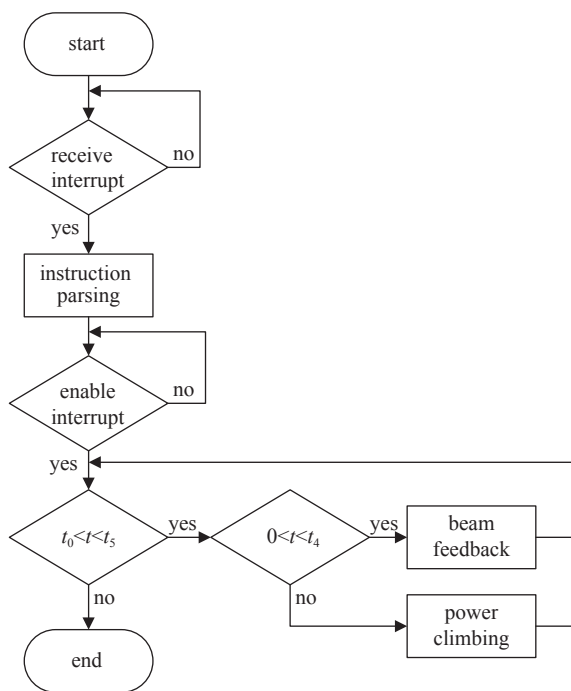


Fig. 4 Workflow of beam feedback control system

图4 束流反馈控制系统工作流程

### 2.2 束流反馈控制台测试

将束流反馈控制系统应用于射频负离子源测试平台之前,对相关功能进行系统测试。测试利用信号发生器输

出的信号作为负离子流的采集信号,并利用光源作用于光耦电路产生使能触发和打火触发。功率爬坡是实现负离子源稳定运行的前提,在此基础上加入束流反馈控制的相关功能,实现功率爬坡是系统运行的第一步。

负离子源测试平台采用 100 kW 全固态大功率射频功率源为离子源提供射频功率,其输出的射频功率大小与 0~10 V 的模拟控制信号线性对应,因此束流反馈控制系统输出的控制信号电压域为 0~10 V。束流反馈控制系统首先接收来自主控系统的参数指令,对指令进行解析后得到功率爬坡时序,接着主控系统会按照设定的系统切入时间给出触发信号,触发束流反馈控制系统开始功率爬坡。图 5 为功率爬坡功能测试结果,利用示波器测试了在使能信号作用下功率爬坡的输出情况(输出信号)。测试实现了爬坡 1(1 s)、平顶 1(4 s @15 kW)、爬坡 2(1 s)、平顶 2(23 s @40 kW)、缓降(1 s)的设定功率爬坡时序,1 ms 的功率变化时间分辨率保证了功率输出曲线的线性度。

在进入平顶 2 阶段的 4 s 后会开始进行束引出,此时进入对束流的反馈控制阶段,图 6 展示了在输入信号为周期 4 s、幅值(6±1)V 的正弦信号时,控制目标为 6V 时反馈控制的响应情况(输出信号)。从响应情况来看,控制系统在单周期内响应完全符合反馈控制规律,测试设定闭环控制周期为 50 ms,功率调节幅度为 30%,在功率调节的过程中由于限幅作用会出现明显的平顶段。同时,由于打火信号的作用,一旦该信号被拉低,即出现了打火的情况,此时会立即停止对束流的反馈调节,进行固定的功率输出,在打火信号恢复后继续开始调节。

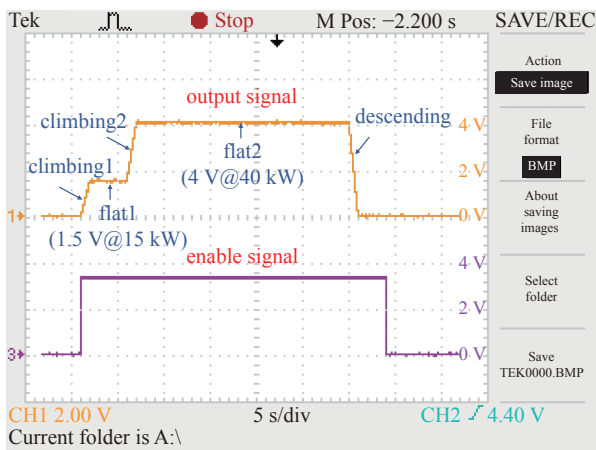


Fig. 5 Test results of power ramp function

图 5 功率爬坡功能测试结果

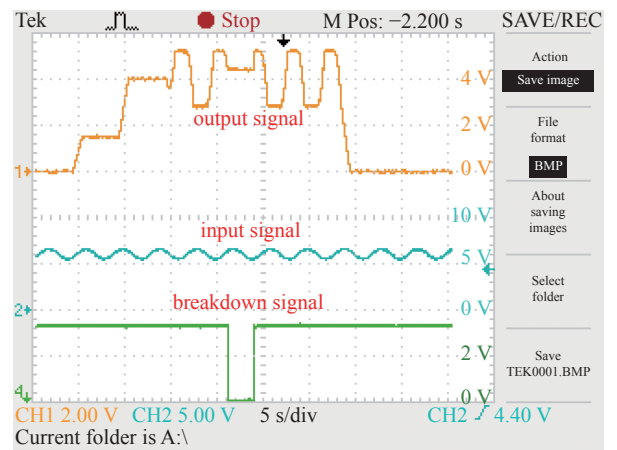


Fig. 6 Test results of beam feedback control function

图 6 束流反馈控制功能测试结果

### 3 实验研究

在束流反馈控制系统测试的基础上,将该系统应用于射频负离子源测试平台,进行了实验研究工作。为了在短脉冲下测试束流反馈控制系统的调节效果,在进行束引出之后,控制过滤磁场电流使束流出现变化。在射频功率 20 kW、引出电压-3 kV、加速电压-15 kV、偏置电压 20 V 条件下,接入束流反馈控制系统前后引出负离子流对比( $I_H$ )以及射频功率的调节动作( $P_{RF}$ )如图 7 所示,其中实线为加入反馈系统前的实验波形,虚线为加入反馈系统后的实验波形。

在负离子源运行过程中,负离子束流大小同射频功率大小呈正比关系,这是通过调节射频功率对束流进行控制的前提和基础。束流反馈控制系统在束流建立的初期一直输出设定功率,直到控制系统完成了对目标束流的采集,得到了在设定功率下的目标值。在运行过程中如果负离子束流偏离目标值,控制系统会根据束流变化情况在闭环反馈的作用下对射频功率进行相应的调节,当束流增加时减小射频功率的输出,反之则增加射频功率的输出。

图 7 炮号 54 775 测试数据(实线)展示了在接入束流反馈控制系统前负离子束流的变化情况,此时输出功率保

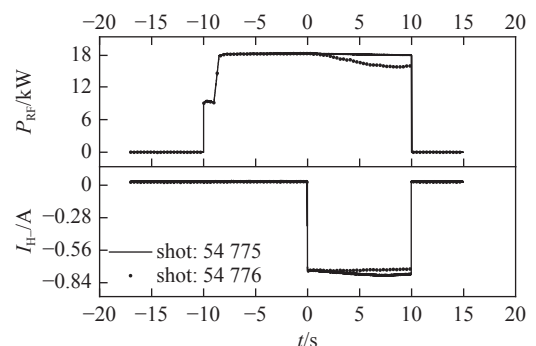


Fig. 7 Comparison of the negative ion current with and without the beam feedback control system ( $I_H$ ) and the adjustment action of the RF power ( $P_{RF}$ )

图 7 接入束流反馈控制系统前后引出负离子流对比( $I_H$ )以及射频功率的调节动作( $P_{RF}$ )

持不变,在束流建立的初期束流呈现相对稳定,随着时间的增加束流有明显上升的趋势。图7炮号54776测试数据(虚线)展示了在接入束流反馈控制系统后负离子束流的变化情况,在完成对束流稳态值的采集之后,开始对束流的反馈控制:随着束流的增加,控制系统在闭环反馈的作用下持续降低射频功率输出,最终使得负离子束流大小处于稳态值附近。

测试结果证明了束流反馈控制系统能够根据束流的变化对射频功率做出正确的调整,束流反馈控制系统快速响应、稳定性好的特点使得其对目标具有很好的跟随效果。

## 4 结 论

为了实现负离子源引出负离子束流的稳定输出,本文针对基于射频功率调节的束流反馈控制系统展开相关研究。首先基于射频负离子源工作原理完成了束流反馈控制系统的需求分析,并提出了相应的实现方案。在此基础上完成了对束流反馈控制系统的设计、系统搭建和相关功能的台面测试,验证了束流反馈模块的可行性和可靠性。最后将束流反馈控制系统应用于射频负离子源测试平台,并开展了实验测试研究,实现了稳定的负离子流输出。实验测试结果证明了束流反馈控制系统对负离子流的调节作用是明显的,能够很好地实现负离子流的稳定输出,验证了通过控制射频功率实现束流稳定输出方案的可行性。后续将根据实验继续开展束流反馈系统的测试和性能优化,为长脉冲稳定负离子束流的引出提供技术支持和经验积累,为磁约束聚变能的发展提供支持。

### 参考文献:

- [1] Xie Yahong, Hu Chundong, Jiang Caichao, et al. Development and first results of large area radio frequency plasma source for EAST neutral beam injector[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 138: 24-26.
- [2] Takeiri Y, Kaneko O, Tsumori K, et al. High performance of neutral beam injectors for extension of LHD operational regime[J]. *Fusion Science and Technology*, 2010, 58(1): 482-488.
- [3] McNeely P, Barlak M, Baldzuhn J, et al. Current status of the neutral beam heating system of W7-X[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(6/8): 1034-1037.
- [4] Huang Meichu, Hu Chundong, Zhao Yuanzhe, et al. The development of data acquisition and control system for extraction power supply of prototype RF ion source[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20: 085602.
- [5] Wei Jianglong, Hu Chundong, Jiang Caichao, et al. Conceptual design of magnetic filter for the prototype negative ion source at ASIPP[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 113: 23-29.
- [6] Franzen P, Wunderlich D, Riedl R, et al. Status of the ELISE test facility[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2015, 1655: 060001.
- [7] Toigo V, Piovan R, Bello S D, et al. The PRIMA test facility: SPIDER and MITICA test-beds for ITER neutral beam injectors[J]. *New Journal of Physics*, 2017, 19: 085004.
- [8] Xie Yahong, Hu Chundong, Wei Jianglong, et al. Research and development progress of radio frequency ion source for neutral beam injector at ASIPP[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 113319.
- [9] Wei Jianglong, Hu Chundong, Xie Yahong, et al. Development of a utility negative ion test equipment with RF source at ASIPP[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(5): 1149-1155.
- [10] Xie Yahong, Hu Chundong, Jiang Caichao, et al. Development and preliminary results of radio frequency ion source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 02B302.
- [11] Su Renxue, Liu Zhiming, Xie Yahong, et al. Studies on the matching network of the high power radio frequency transmitter for the NBI RF ion source[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2015, 34(1): 24-28.
- [12] Wei Jianglong, Xie Yahong, Jiang Caichao, et al. Hefei utility negative ions test equipment with RF source: commissioning and first results[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20: 125601.
- [13] Franzen P, Obermayer S, Schäffler J, et al. Beam current feedback regulation of the RF neutral beam sources of ASDEX Upgrade[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 56/57: 487-491.
- [14] Zhang Xiaodan, Wang Xiaoying, Hu Chundong, et al. The development of data acquisition and processing application system for RF ion source[J]. *Plasma Science and Technology*, 2017, 19: 075602.
- [15] 蒋才超. 大功率RF离子源功率馈入关键技术及实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 79-82. (Jiang Caichao. Study on key technology and experiment of power feed-in for high power RF ion source[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 79-82)
- [16] Xie Yahong, Hu Chundong, Jiang Caichao, et al. Design and preliminary results of beam re-turn on of high power ion source[J]. *Plasma Science and Technology*, 2019, 21: 105601.