



## CSNS射频负氢离子源控制系统研制

薛康佳 陈卫东 何泳成 李辉 朱仁丽 张玉亮 朱鹏 吴焯 王林

### Development of Control System for CSNS RF Driven Ion Source

XUE Kangjia, CHEN Weidong, HE Yongcheng, LI Hui, ZHU Renli, ZHANG Yuliang, ZHU Peng, WU Xuan, WANG Lin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022064>

#### 引用格式:

薛康佳, 陈卫东, 何泳成, 李辉, 朱仁丽, 张玉亮, 朱鹏, 吴焯, 王林. CSNS射频负氢离子源控制系统研制[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(2):214–220. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022064

XUE Kangjia, CHEN Weidong, HE Yongcheng, LI Hui, ZHU Renli, ZHANG Yuliang, ZHU Peng, WU Xuan, WANG Lin. Development of Control System for CSNS RF Driven Ion Source[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(2):214–220. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022064

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 重离子治疗装置同步加速器高频控制系统研制

Development of RF Control System for Heavy Ion Medical Machine

原子核物理评论. 2019, 36(1): 55–61 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.055>

#### 医用加速器装置的离子源进气系统控制

Design of Ion Source Gas Control Used in Heavy Ion Medical Machine

原子核物理评论. 2019, 36(4): 441–446 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.441>

#### 一种测量重核素的小型高压型加速器控制系统的研制

Development of a Control System for a Small High-pressure Accelerator for Measuring Heavy Nuclide

原子核物理评论. 2019, 36(4): 426–432 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.426>

#### 重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector

原子核物理评论. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

#### 基于EPICS的颗粒传热实验测控系统应用研究

Application Research on Measurement and Control System of Particles Heat Transfer Experiment Based on EPICS

原子核物理评论. 2019, 36(3): 388–393 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.388>

#### 基于PSA敏感性分析的核电稳压器数字控制系统可靠性研究

Research on the Reliability of Digital Control System in Nuclear Power Plants Based on PSA Sensitivity

原子核物理评论. 2021, 38(3): 355–360 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020081>

文章编号: 1007-4627(2023)02-0214-07

## CSNS 射频负氢离子源控制系统研制

薛康佳<sup>1,2</sup>, 陈卫东<sup>1,2,3,†</sup>, 何泳成<sup>1,2,3</sup>, 李辉<sup>1,2,3</sup>, 朱仁丽<sup>1,2,3</sup>,  
张玉亮<sup>1,2,3</sup>, 朱鹏<sup>1,2,3</sup>, 吴焯<sup>1,2,3</sup>, 王林<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;  
2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523808;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为满足中国散裂中子源打靶功率提升需求, 加速器采用外置天线射频负氢离子源替换此前使用的潘宁表面负氢离子源, 为加速器提供高品质和高稳定的束流。文章主要介绍了基于 EPICS 软件系统和 PLC 硬件平台的射频负氢离子源控制系统设计方案和具体实现。针对射频功率源的电磁干扰和高压平台打火造成设备损坏, 给出了相应的解决措施。此外, 为提高离子源长期运行稳定性, 设计了放电室高精度注铯控制程序及打靶功率稳定程序。控制系统自投入运行以来, 运行稳定可靠, 为离子源的高效运行提供了有力保障。

**关键词:** 控制系统; EPICS; 射频离子源; 高压打火保护; CSNS

**中图分类号:** TL503.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022064

### 0 引言

中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 是国家“十二五”期间重点建设的十二大科学装置之首, 为我国材料科学技术、物理、化学化工、生命科学、资源环境和新能源等提供一个先进、功能强大的科研平台<sup>[1-2]</sup>。CSNS 早期采用的潘宁表面负氢离子源, 在流强和发射度等方面能满足 100 kW 打靶束流功率的需要, 造价也相对便宜。为实现 CSNS 加速器束流功率从 100 kW 提升至 500 kW 的目标, 要求直线加速器脉冲束流强度从目前的 12.5 mA 提高到 40 mA。而潘宁型表面负氢离子源产生的满足 RFQ 入口  $0.2 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  的负氢流强最大约 20 mA, 难以满足直线加速器脉冲流强 40 mA 的要求。因此, 离子源需从此前采用的潘宁型表面负氢离子源替换为射频负氢离子源。

在长期运行中, 潘宁负氢离子源存在一些问题, 例如 50 kV 高压平台打火造成设备损坏、放电室进铯量难以稳定以及离子源输出流强缓慢变化等。这些问题可以通过控制系统进行优化, 为了满足射频负氢离子源的稳定运行需求, 本文借鉴前期潘宁负氢离子源控制系统建造及运行的经验, 对射频负氢离子源的控制方案及实现进行了相关设计。

### 1 系统需求和总体设计

CSNS 射频负氢离子源的设备如图 1 所示, 分布在 50 kV 高压平台和地电位平台两个位置。为保证高压平台和地电位平台的电气隔离, 采用耐压 80 kV 的隔离变压器为高压平台的设备提供 220 V 交流电, 并使用光纤连接方式来实现两个平台控制机柜之间的通讯。

控制系统需要实现对气体流量计、气体压力传感器、水流量开关、温度传感器、外部联锁以及多种类型的直流和射频电源进行监测和控制。被控设备的接口类型包含模拟量接口、RS232 接口、RS485 接口以及以太网接口等。通讯协议包含 Modbus(一种串行通信协议)、可编程仪器标准命令 (Standard Commands for Programmable Instruments, SCPI) 和厂家自定义协议。

控制系统基于分布式实时控制软件 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) 架构搭建, 控制硬件主要采用可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 和串口服务器构成, 分别实现对模拟量及各不同类型数字量设备的控制。考虑到 2 MHz ~ 80 kW 的射频功率源产生的电磁干扰对模拟量造成的影响具有不确定性, 在本设计中, 对同时拥有模拟量接

收稿日期: 2022-05-20; 修改日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金大科学装置联合基金项目 (U1832163)

作者简介: 薛康佳 (1991-), 男, 广东兴宁人, 实验师, 硕士, 主要从事加速器控制研究; E-mail: xuekj@ihep.ac.cn

† 通信作者: 陈卫东, Email: chenwd@ihep.ac.cn

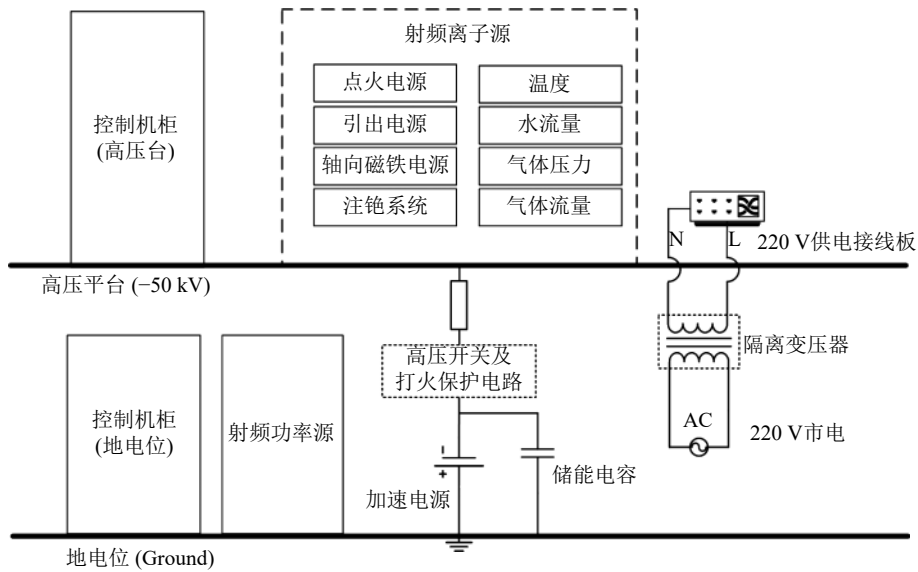


图 1 射频离子源设备分布示意图

口和数字量接口的设备，优先使用数字量接口进行通讯。对于仅有模拟量接口的设备，采用 PLC 控制。所有设备的联锁信号统一由 PLC 的开关量提供。

针对离子源长时间运行时流强存在缓慢变化的情况，本系统采用优化方案如下：在正常出束时以打靶功率作为反馈，通过程序自动调节离子源参数，实现更稳定的打靶功率。另外，采用铯温 PID 控制和气动铯阀占空比控制的方案，实现对放电室进铯量的准确控制。

由于高压平台对地打火时可能会对高压平台及地电位上的设备造成损坏，因此，在加速电源的输出回路串联固态高压开关，并自行研制了高压平台打火保护电路，如图 1 所示。该电路可以在打火时快速断开储能电容及 50 kV 加速电源与高压平台的连接，降低运行时设备损坏的几率。

## 2 控制系统实现

### 2.1 基于 PLC 的控制与联锁

射频离子源的模拟量设备以及联锁控制采用 PLC 实现，PLC 具有可靠性高、编程方便、控制功能极强、扩展及与外部连接极为方便的特点<sup>[3]</sup>；基于 PLC 的控制与联锁系统硬件结构如图 2 所示，系统使用 1 套横河 FA-M3 PLC 实现对离子源设备的控制：整套横河 PLC 由 1 个主单元和 2 个子单元组成，主单元在地电位控制机柜内，用于控制地电位的被控设备；而子单元在高压平台的控制机柜内，用于控制高压平台上的被控设备；主单元和子单元间通过 FA-Bus 光纤模块通讯。在横河 PLC 主单元中分别同时安装 1 个顺控 CPU 模块和 1 个嵌入式 CPU 模块 (F3RP61)。顺控 CPU 用于实现 IO 模块读

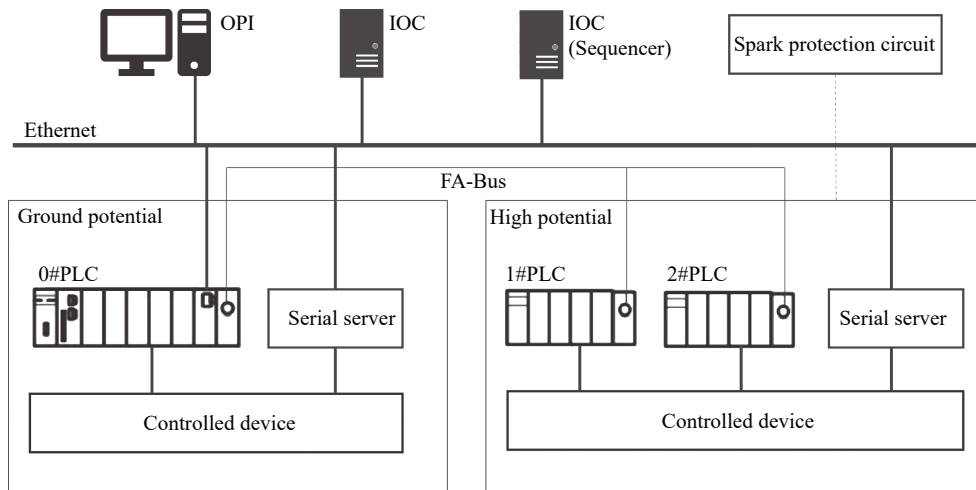


图 2 硬件结构图

写和联锁保护等；嵌入式 CPU 模块用于运行嵌入式 EPICS IOC(Input/Output Controller)，使 PLC 中的数据直接接入 EPICS 中。整个系统具有简单、稳定和可靠性高的特点。

### 2.2 基于 StreamDevice 和 Modbus 的设备控制

如图 3 所示，对于采用以太网接口的设备，使用单独的 EPICS IOC 通过网络实现与设备通讯。采用 RS232 接口与 RS485 接口的设备，则 IOC 通过网络连接串口服务器后，实现与设备通讯。在软件方面，分别使用了 EPICS 的 Modbus 模块 [4]StreamDevice 模块 [5]实现了 IOC 与设备间的 Modbus、SCPI 及自定义协议通讯。由于高压台与地电位之间有 50 kV 的电压差，无法使用普通金属网线，因此本设计在高压台和地电位的控制机柜内各使用 1 个含光口的 MOXA EDS-208A 工业以太网交换机，通过 SC-SC 多模双芯光纤网线相互连接。

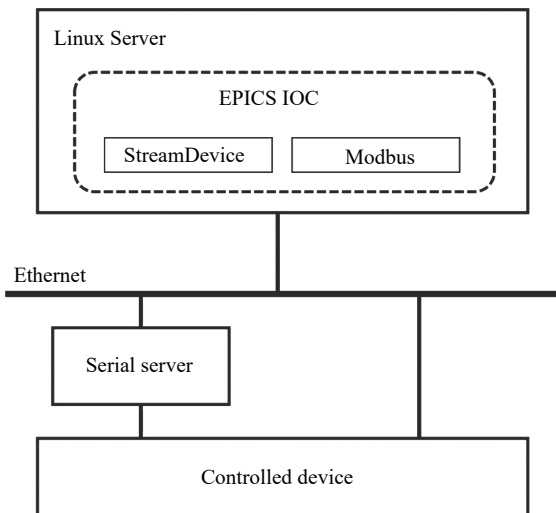


图 3 基于 StreamDevice 和 Modbus 的设备控制

射频功率源工作时将通过线路传播及空间传播对控制系统造成高频电磁干扰。数字量相对模拟量通讯有更

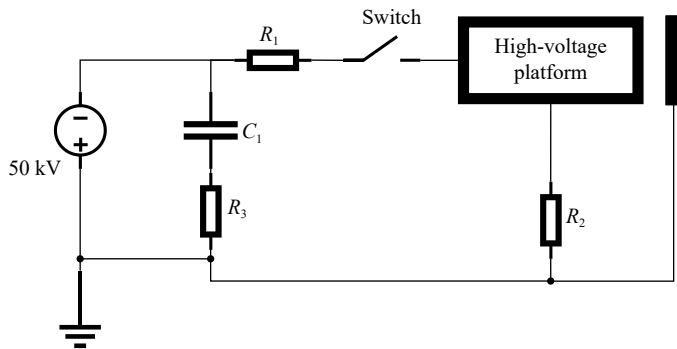
强的抗干扰能力，本设计中通过优先使用数字量接口解决了大部分设备通讯被干扰的问题。对于模拟量信号则采取了如下措施：加强线缆屏蔽，确保线缆的屏蔽层在控制机柜端与设备端均接地良好，部分受干扰的线缆使用铝箔缠绕后接地；采用金属线槽走线，缩短线缆在金属线槽及机柜以外的部分；同时，部分信号使用磁环或 RC 滤波电路以降低射频干扰造成的影响。

### 2.3 高压平台打火保护电路设计

射频负氢离子源采用 25 Hz 脉冲出束方式，引出束流宏脉宽为 500  $\mu\text{s}$ 。为减小运行时高压平台的周期性电压顶降，加速电源输出需并联高压储能电容。这导致平台打火时放电能量更大，较易造成设备损坏。为此，设计了专门的高压平台打火保护电路，在平台打火时立即切断储能电容与平台的连接，以降低设备的损坏机率。

图 4(a)为高压平台的供电原理图，本设计在储能电容  $C_1$  与平台之间串联高压开关，同时在电容回路串联取样电阻  $R_3$ ，当平台发生对地打火时，取样电阻  $R_3$  两端电压增大，保护电路以此作为打火判据，将高压开关快速断开。图 4(a)所示的开关采用固态高压开关，保护电路输出 5 V 电压信号控制开关的通断，高压开关允许的最大工作电压为 70 kV，自身的最小断开时间为 250 ns。图 4(b)为高压平台打火保护电路的实物图。经测试，高压平台发生打火时，电路可在 2  $\mu\text{s}$  内断开平台的高压。

保护电路包括信号比较电路、控制电路、LED 指示灯、驱动电路和通讯电路。信号比较电路通常采用专用的电压比较器，然而，在实际运行环境中高压打火常造成电压比较器损坏。因此，本设计如图 5 所示，使用 MOS 管设计信号比较电路用于判断是否打火，控制电路采用 STM32F1 系列单片机作为主控芯片运行程序逻辑，LED 指示灯用于本地显示运行状态，驱动电路用于提高到高压开关的输出电流，通讯电路采用 RS485 接



(a) 供电原理图



(b) 高压平台打火保护电路实物

图 4 高压平台供电原理图与实物图(在线彩图)

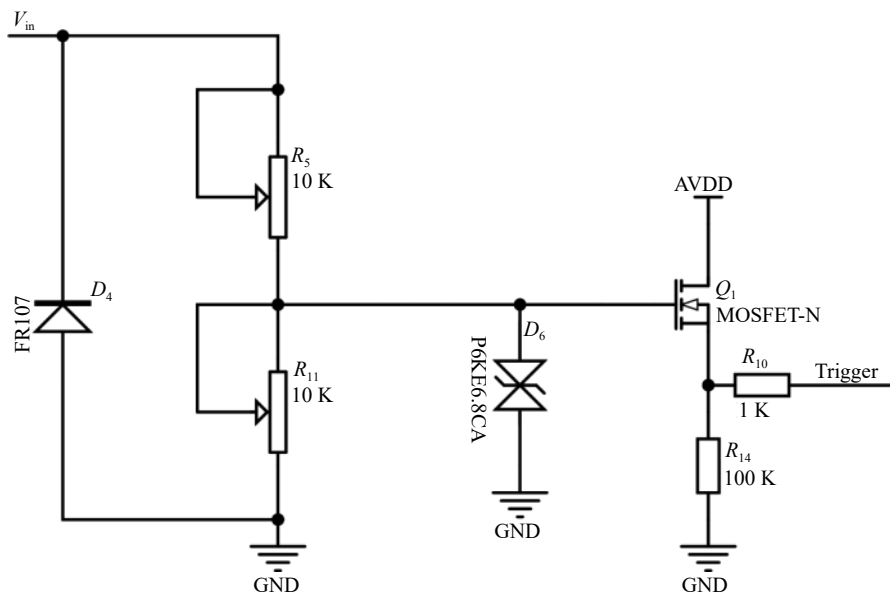
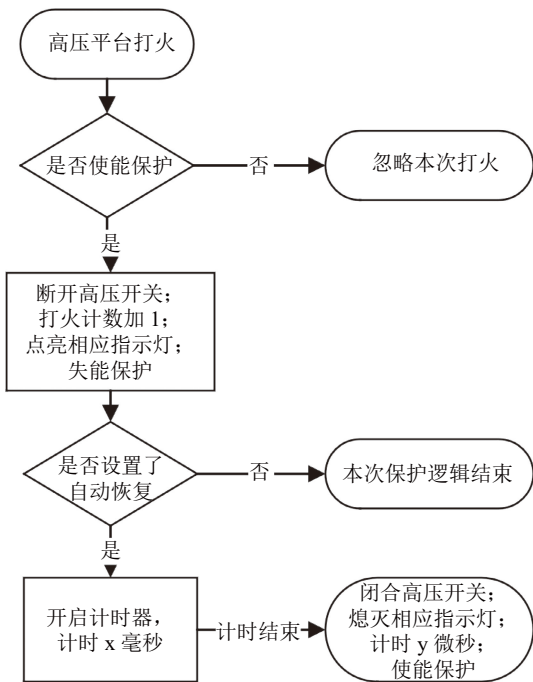


图 5 电压比较电路

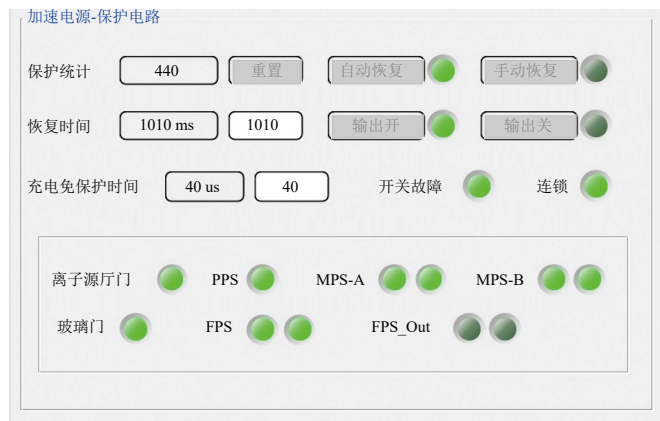
口并使用自定义的通讯协议与 EPICS IOC 通讯。

当发生高压打火后，重新闭合高压开关给高压平台充电需要一定时间，此时回路电流较大，会超出保护阈值，导致再次触发打火保护。为避免电路在恢复和保护的两个状态之间反复循环，闭合高压开关时需指定延迟保护时间，使高压平台电容充电完成后再恢复保护使能。完整逻辑如图 6(a) 所示，检测到高压平台打火后，如果使能了保护功能，则断开高压开关并失能保护；如果处于手动恢复模式则本次保护逻辑结束，需等待界面操作

后再闭合高压开关(输出开)，然后在延迟设置的充电免保护时间后重新使能保护；如果处于自动恢复模式，延时指定的恢复时间后自动闭合高压开关，然后在延迟设置的充电免保护时间后重新使能保护。由于充电免保护时间与平台电容值存在相关性，需随平台的调整按需修改，因此把免保护时间设置为可在界面修改的变量；高压平台充电回路为 RC 电路，目前采用的限流电阻为 5 kΩ，测量平台的电容值约 2 nF，因此电路的时间常数 RC 为 10 μs，由 RC 电路充电公式可知，经过 30 μs(即 3RC)后



(a) 逻辑流程图



(b) 远控操作界面

图 6 程序逻辑与操作界面(在线彩图)



平台电压可达到储能电容的 95%，充电过程基本结束，实际测试设置闭合开关后延迟 40 μs 免保护，可避免平台的正常充电过程造成误保护。

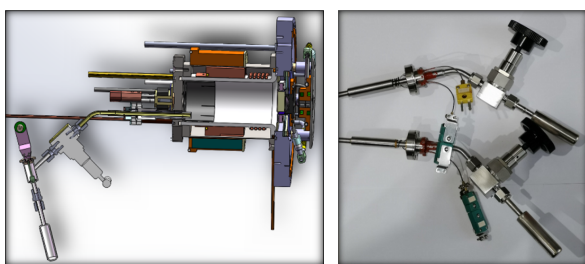
除了具备打火自动保护功能，保护电路同时支持通过命令手动闭合或断开高压开关以及支持外部联锁输入功能。由于在平台供电回路并联储能电容，导致平台升降压较慢，因此运行时加速电源始终保持在正常输出状态，加速器出束和停束操作通过操作高压开关的通断实现，同时本电路也作为加速器联锁停束的执行器，图 6(b) 所示为电路的远控操作界面。

### 3 运行辅助程序设计

为满足降低值班人员操作频次以及使离子源输出流强更为稳定的需求，设计了铯温比例、积分、微分控制 (PID) 和铯阀占空比控制结合的注铯系统控制方案，以及开发了打靶功率稳定程序。

#### 3.1 注铯系统

CSNS 目前采用的是铯催化的外置天线射频负氢离子源<sup>[6]</sup>，图 7(a) 为射频负氢离子源剖面图，图 7(b) 为注铯管道实物图。注铯量对离子源的流强与工作状态有重要影响。运行时，在注铯管道缠绕加热丝以及裹上保温层，通过加热控制到放电室的进铯量，同时本设计预留气动铯阀的控制接口及程序，即注铯系统的控制主要分为两部分：铯温 PID 控制和气动铯阀占空比控制。



(a) 射频负氢离子源剖面 (b) 注铯管道实物

图 7 注铯结构图(在线彩图)

铯温采用 PID 控制方式，使用基于 DESY PID 修改的 PID 模块<sup>[7]</sup>，该模块功能较为丰富，除了  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  调节参数，以及监测值和目标设定值之外，同时还提供了 SRAT 和 SGAP 等域。SRAT 限定了 PID 每次计算时偏差 ERR 的最大值，而 SGAP 则决定 PID 计算中偏差 ERR 的最小值，即当 ERR 小于 SGAP 时 PID 程序停止计算。ERR 指目标设定值与监测值之间的差值。

气动铯阀占空比控制采用 EPICS 实时数据库<sup>[8]</sup>的方式开发，软件逻辑如图 8 所示。任何情况下发生真空联锁时强制关闭铯阀。当真空正常时，处于手动操作模

式则需通过界面手动操作打开或关闭铯阀，处于自动操作模式则软件将按设定的计时周期及每个周期内打开铯阀的时间自动操作铯阀，用户界面如图 9 所示。

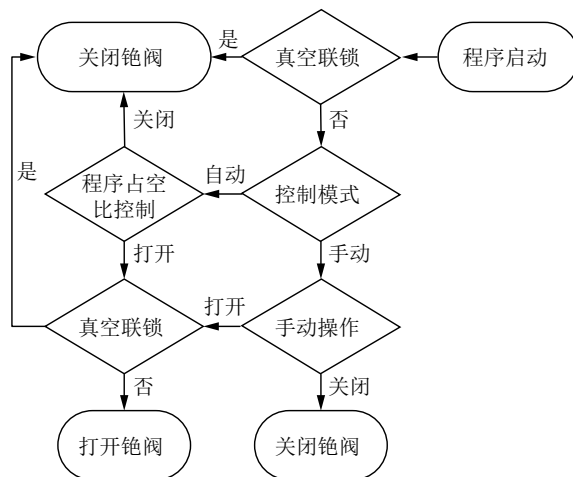


图 8 程序逻辑



图 9 铯阀操作界面(在线彩图)

#### 3.2 打靶功率稳定程序

离子源长时间运行时，输出流强存在缓慢变化的情况，造成打靶功率波动。本设计在正常出束时以打靶功率作为反馈，通过程序自动调节离子源出口的螺线管电流大小，使打靶功率保持稳定。程序采用 SNL(State Notation Language) 程序<sup>[9]</sup>与 EPICS 实时数据库结合方式开发。

打靶功率稳定程序的操作界面如图 10 所示，程序的主要逻辑，为当打靶功率大于设定的最大打靶功率时，按照设定的电流调节步长逐步增加螺线管电流，直到打靶功率小于最大打靶功率；当打靶功率小于最小打靶功率时，则反向操作。为避免偶尔的束流波动造成误操作，

程序采取了 3 个措施: 1) 对打靶功率取多次平均, 以取平均后的打靶功率作为反馈值; 2) 仅当打靶功率大于程序启动下限打靶功率时才启动调节, 否则暂停操作,

以避免停束后依然不断加大螺线管电流; 3) 程序启动前将判断当前电流设定值是否处于最大最小电流设定值范围内, 超出范围则停止操作并发出声音报警。

LEBT SOLPS02 自动调节程序参数

自动调节开关	开	关	开	预设电流	28.24 A
电流调节步长	0.02 A				
最大电流设定值	30.00 A				
最小电流设定值	0.00 A				
最大打靶功率	125.50 kW				
最小打靶功率	124.50 kW				
程序启动下限打靶功率	100.00 kW				
打靶功率平均值	124.777 kW				
电流设定值	28.240 A				

图 10 自动调节程序操作界面(在线彩图)

## 4 系统运行情况

实验阶段主要出现射频干扰及平台打火造成设备损坏的问题, 射频负氢离子源使用 2 MHz 射频信号产生负氢离子, 电源最大功率达到 80 kW, 大功率的射频信号对部分被控设备的通讯造成干扰, 采取 2.2 节所述的优化措施后解决了干扰问题。高压平台对地打火曾多次造成平台上的设备损坏, 使用高压平台打火保护电路后有效降低了损坏几率, 同时加强各设备到平台地的连接、更换串口服务器为具有浪涌保护功能的串口服务器以及在各控制接口并联瞬态二极管(TVS)、气体放电管等防雷保护组件等。通过这些措施, 离子源迁入 CSNS 加速器隧道正式使用后未再发生高压打火造成设备损坏的情况。

自 2021 年 7 月起, 射频离子源正式迁移到 CSNS 隧道并开始运行。至今, 离子源保持了稳定运行, 并且其出束效率大于 99.9%, 控制系统为其稳定运行提供了有力的保障。

## 5 结束语

负氢离子源作为散裂中子源加速器的起点, 能否提供高品质和稳定性好的束流关系到整个加速器及散裂中子源的性能和工作效率。本系统结合 CSNS 此前采用的潘宁负氢离子源控制系统建造以及运行的经验, 进一步优化, 设计和实现了 CSNS 的射频负氢离子源控制系统,

并在工程中得到应用。在 CSNS 供束运行过程中, 离子源控制系统运行可靠、稳定。该控制系统对其它类似离子源控制系统有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] CHEN Hesheng. Modern Physics, 2016, 28(1): 3. (in Chinese) (陈和生. 现代物理知识, 2016, 28(1): 3.)
- [2] CHEN Yanwei. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2011(6): 726. (in Chinese) (陈延伟. 中国科学院院刊, 2011(6): 726.)
- [3] PAN Yong, GAO Junxiong, WANG Gengbo, et al. Computer & Digital Engineering, 2007(2): 76. (in Chinese) (潘勇, 高俊雄, 王耘波. 计算机与数字工程, 2007(2): 76.)
- [4] EPICS ModBus Module[EB/OL]. [2022-04-15]. <https://cars9.uchicago.edu/software/epics/modbusDoc.html>.
- [5] StreamDevice homepage[EB/OL]. [2022-04-15]. <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/>.
- [6] LI Hui. Key Technologies Research of External Antenna RF-driven H-ion Sources in CSNS[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 (in Chinese). (李辉. CSNS 外置天线射频负氢离子源关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.)
- [7] LU Yanhua. Study of H-ion Source Control System for CSNS[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese) (卢艳华. 中国散裂中子源负氢离子源的控制系统的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.)
- [8] EPICS User Documentation [EB/OL]. [2022-04-15]. [https://wiki-ext.aps.anl.gov/epics/index.php/User\\_Documentation](https://wiki-ext.aps.anl.gov/epics/index.php/User_Documentation).
- [9] Sequencer Homepage[EB/OL]. [2022-04-15]. <https://www-csr.bessy.de/control/SoftDist/sequencer/>.

## Development of Control System for CSNS RF Driven Ion Source

XUE Kangjia<sup>1,2</sup>, CHEN Weidong<sup>1,2,3,†</sup>, HE Yongcheng<sup>1,2,3</sup>, LI Hui<sup>1,2,3</sup>, ZHU Renli<sup>1,2,3</sup>,

ZHANG Yuliang<sup>1,2,3</sup>, ZHU Peng<sup>1,2,3</sup>, WU Xuan<sup>1,2,3</sup>, WANG Lin<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, Guangdong, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The China Spallation Neutron Source(CSNS) has experienced a growing demand for increased beam power, necessitating the replacement of their previous Panning H-ion source with an external antenna RF driven H-ion source. This paper outlines the design and implementation of the control system for this new ion source based on EPICS and PLC. To ensure a stable and reliable operation, solutions were developed to optimize to optimize electromagnetic interference and prevent equipment damage caused by high voltage platform ignition. Additionally, operational assistance programs were designed to improve the long-term stability of the ion source. The control system has been successfully implemented, it has been stable and reliable, providing strong support for the efficient operation of the ion source.

**Key words:** control system; EPICS; RF-driven H-ion source; spark protection circuit; CSNS

---

**Received date:** 20 May 2022; **Revised date:** 14 Jun. 2022

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(U1832163)

**Biography:** [xuekj@ihep.ac.cn](mailto:xuekj@ihep.ac.cn)

† **Corresponding author:** CHEN Weidong, [chenwd@ihep.ac.cn](mailto:chenwd@ihep.ac.cn)