



·离子束科学技术及其应用·

锦屏深地强流离子源控制系统的研制*

王鹏鹏^{1,2}, 张 玮^{1,2}, 武 启^{1,2}, 安 石^{1,2}, 岳 敏^{1,2}, 常建军¹, 安敬蕊¹

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 对锦屏深地核天体物理实验 JUNA (Jinping Underground laboratory for Nuclear Astro-physics) 离子源控制系统进行了研究, 采用分布式系统模型构建。硬件采用 PLC、串口服务器、伺服电机及工控机等部件实现了离子源设备的远程监测及控制。软件通过建立 EPICS IOC 运行时数据库, 实现了对所有被控设备的集成。用户操作界面采用 CSS (Control System Studio) 开发, 实现了操作人员对所有被控设备的透明访问。基于安全连锁规则设计了机器保护系统, 实现了运行异常下的连锁保护。该控制系统应用于国内首套深地实验强流 ECR 离子源, 运行稳定可靠, 完全满足 JUNA 运行及物理实验的需求。

关键词: JUNA 离子源; 控制系统; 安全连锁

中图分类号: TL503.6

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220356

Development of control system for JUNA ion source

Wang Pengpeng^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Wu Qi^{1,2}, An Shi^{1,2},
Yue Min^{1,2}, Chang Jianjun¹, An Jingrui¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

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

Abstract: The control system for the ion source of the JUNA (Jinping Underground laboratory for Nuclear Astro-physics) was designed and implemented. It is built by using a distributed system model. The hardware adopts PLC, serial device server, servo motor, industrial computer, and other components to realize the remote monitoring and controlling of ion source devices. The software integrates all controlled devices by establishing the EPICS IOC run-time databases. The user interface layer is developed by using Control System Studio to achieve transparent access to all controlled devices by operators. The machine protection system is designed based on safety rules to realize protection in the case of abnormal operations. It is used in the first underground ECR ion source in China and is stable and reliable, which fully meets the needs of the JUNA tuning and physical experiments.

Key words: JUNA ion source, control system, safety interlock

核天体物理的主要研究目标是应用核物理的知识和规律来阐释宇宙中元素的起源及演化, 恒星中核合成过程、能量产生, 驱动天体物理现象的机制等科学问题。深地实验室能够极大地屏蔽宇宙射线造成的本底, 从而实现稀有反应事件的实验测量。中国锦屏地下实验室 (China Jinping Underground Laboratory, 简称 CJPL) 利用锦屏水电工程交通隧道建成了世界上最深的深地实验室, 其地下实验条件极为理想^[1-3]。锦屏深地核天体物理实验 (JUNA) 项目将利用 CJPL 的良好条件, 在天体物理伽莫夫能量窗口开展核天体关键反应²⁵Mg(p,γ)²⁶Al、¹⁹F(p,α)¹⁶O、¹³C(α,n)¹⁶O 和¹²C(α,γ)¹⁶O 的直接测量, 为理解恒星演化和元素起源提供新的数据。JUNA 合作组完成了高性能 400 kV 强流加速器的总体结构设计, 整个装置包括强流离子源、带分析系统的低能传输线、高压平台、加速管、高能束运线及实验终端系统。项目目标是研制的离子源能够产生 10 mA 的质子束、6 mA 的 He⁺束流及 2.5 mA 的 He²⁺束流。综合考虑束流传输效率、离子纯度以及空间布局, 低能传输线采用双螺线管和 30° 小型二极管结构, 能够很好的分离 H⁺、He⁺ 以及 He²⁺ 离子。强流离子源与 400 kV 高压加速器耦合安装于 CJPL, 使我国成为第一个地下使用

* 收稿日期: 2022-12-28; 修订日期: 2023-07-13

基金项目: 兰州重离子国家实验室改造项目 (Y9HIRLL100)

联系方式: 王鹏鹏, 757190430@qq.com。

强流 ECR 离子源及加速器的国家。

控制系统作为整个加速器的关键部分,其性能直接影响离子源及加速器的运行效率、四个核反应的实验效率及科研成果。设备的精密调控、安全连锁以及长期稳定运行是该控制系统研制的技术难点。基于以上问题,本文主要对悬浮于 400 kV 高压电位上的 ECR 离子源和低能传输线的控制系统进行了关键技术研究。

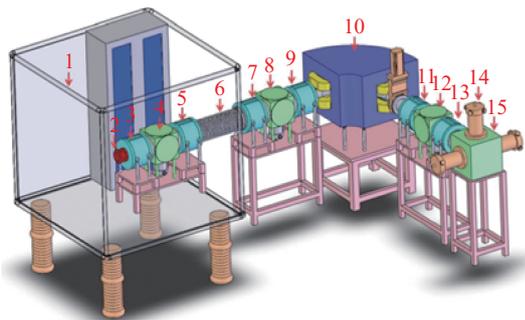
1 系统结构

JUNA 项目对离子源的技术要求如表 1 所示。图 1(a)所示为 JUNA 加速器总体布局,主要包括:1-高压平台;2-离子源;3、5、7、9、11、13-磁聚焦透镜;4、8、12-束诊及真空装置;6-加速管;10-分析磁铁;14-探测系统;15-测量靶室。如图 1(b)所示,400 kV 高压端的被控设备主要有:1)配水:螺线管、分析铁水温水压监测二次仪表、水流状态监测继电器;2)真空:分子泵控制器、真空计、电动角阀、闸板阀、电阻规真空计;3)磁场电源:校正、分析铁及透镜电源;4)高压:高压、偏压电源;5)进气:进气电机;6)束测:法拉第筒、四分板、DCCT、法拉第筒束流监测、可调光阑电机;7)微波:微波电源、微波调谐器;8)温度监测:PT100 等。上述被控设备硬件接口及控制协议复杂,有 RS232、RS485、以太网等数字接口,也有开关量输入输出、模拟量输入输出等;有 Modbus RTU、ASCII 等工业标准控制协议,也有设备厂家自定义协议。JUNA 离子源控制系统须满足以下控制要求:1)束流强度可调;2)可根据实验要求选出特定的离子,这需要控制分析铁电源扫谱;3)由于静电高压打火,高压平台与地电位之间必须进行电气安全隔离,使高压端和地端设备统一整合入 JUNA 控制系统中;4)实现设备的远程监控并提供透明访问;5)基于连锁规则设计慢连锁保护系统。

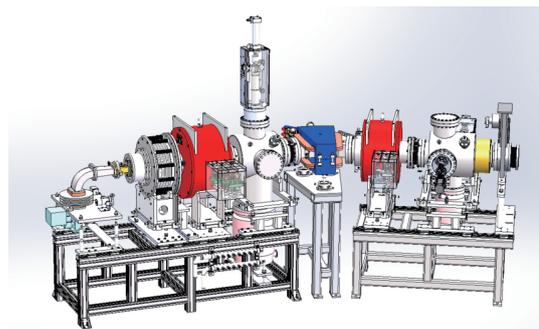
表 1 离子源技术要求

Table 1 Requirements of JUNA ion source

beam energy/kV	RF/GHz	number of extraction electrodes	emittance/ (π -mm-mrad)	beam current/mA		
				H ⁺	He ⁺	He ²⁺
50	2.45&14.5	3	≤ 0.2	10	6	~ 2.5



(a) overall layout of JUNA



(b) layout of JUNA ion source system

Fig. 1 Layout of JUNA accelerator

图 1 JUNA 加速器布局图

EPICS 是一套基于以太网的分布式控制系统框架,已被世界上多个大型实验物理装置所采用,可保障加速器装置控制系统的稳定性和可靠性,且能极大简化控制系统的开发,JUNA 离子源控制系统也基于 EPICS 框架实现。针对上述控制要求,综合被控设备硬件接口及控制协议,控制系统的结构如图 2 所示。所有串口被控设备通过研华 EKI-1526 串口服务器接入到控制网,开关量、模拟量控制通过西门子 S7PLC 实现,离子源所在的 400 kV 高压端和地端通过光纤实现数据通信,可以起到电磁隔离作用^[4-7]。由于高压平台是高电位工作,在装置运行中不可避免会产生静电累积而发生打火,PLC 供电采用了浪涌保护器和 EMI 滤波器,所有模拟量均使用了光电隔离器进行电气隔离,所有开关量均使用继电器进行电气隔离。

2 控制软件设计

软件主要包含 PLC、IOC(Input Output Controller)控制程序及上位机界面的开发,控制软件结构如图 3 所示^[8]。因为所有串口设备通讯通过串口服务器转换为网络协议,所以控制系统中 IOC 开发包括基于 S7PLC 驱动的西门子 PLC IOC 程序和自研的基于 TCP/IP 协议的数字接口 IOC 程序。

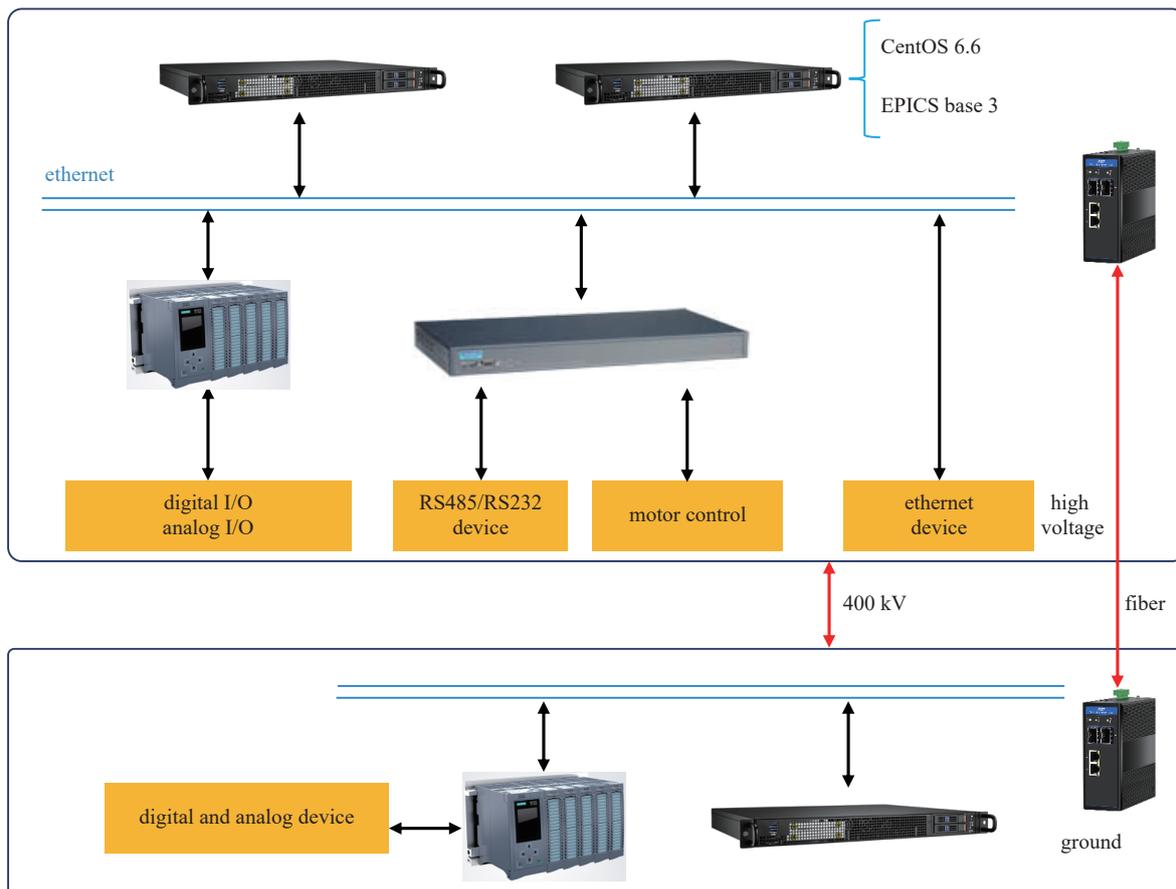


Fig. 2 Block diagram of JUNA ion source control system

图 2 JUNA 离子源控制系统结构

2.1 PLC 程序

该系统被控设备较多, 需要使用大量的西门子信号模块。JUNA 空间紧凑主要体现在两方面: 1) 紧凑型低能传输线设计, 由双螺线管和 30° 二极铁组合; 2) 紧凑型高压平台设计, 平台上承载了离子源及低能传输线、电源机柜、控制机柜及配电箱。受限于高压平台空间, 控制系统硬件机柜可用空间极小, PLC 控制采用 IM365 接口模块实现主机架和扩展机架的模式, 在单个 PLC 机柜内完成所有信号模块的集成。IM365 总是成对出现, 一个订货号包含两个 IM365 (安装在主机架上的 IM365 Send 和安装在扩展机架上的 IM365 Receive) 和连接两者的电缆。PLC 程序设计时, 创建共享数据块 DB10 和 DB11。模拟量、数字量输入读取到数据块 DB10, PLC

程序通过调用函数库中的 AG_SEND 周期性地发送 DB10 中的监测数据给 PLC IOC; 为了接收从 PLC IOC 下发的参数, PLC 程序通过调用函数库中的 AG_RECV 监听自以太网信息存于 DB11, 然后读取 DB11 中的信息控制模拟量、数字量输出模块。

2.2 PLC IOC

控制系统需要把 S7PLC 集成到 EPICS 环境, S7PLC 是一款通过 TCP/IP 协议连接西门子 S7PLC 和 EPICS IOC 的驱动, 使用“send/receive”协议实现, 控制系统在实现 S7PLC PV(Process Variables) 发布时, 使用了该驱动包。以高压电源电压设置记录(record)为例, 如表 2 所示, DTYP 域需要指明驱动类型为 S7PLC。

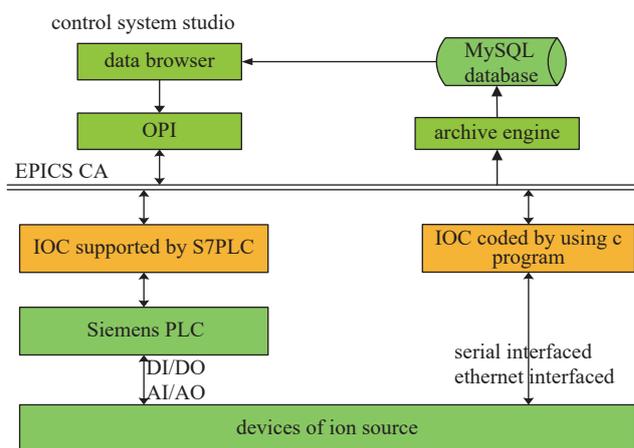


Fig. 3 Software block diagram of JUNA ion source control system

图 3 JUNA 离子源控制软件结构

表 2 高压电源电压设置记录

Table 2 Record for high-voltage setting

EPICS record for high-voltage power supply
<pre>record (ao, "ECR_PS:HV_01:Vset") { field (DTYP, "S7PLC") field (EGUL, "0") field (EGUF, "10") field (OUT, "@Testsystem:0/2 'T=INT16 L=0 H=27 648' ") field (LINR, "LINEAR") field (PINI, "YES") field (ASLO, "6.0") field (EGU, "kV") }</pre>

2.3 数字接口 IOC

控制系统数字接口设备较多,以串口微波电源控制为例阐述 IOC 的开发:1)硬件连接:微波电源通过串口服务器连接到控制网;2)控制需求分析:高压电压及电流设定、脉冲频率脉宽设定、高压电压电流显示、灯丝电压电流显示、正常/故障、本控/远控、复位、高压指示、启动、触发、直流/脉冲切换;3)微波电源控制协议:Modbus ASCII 模式、波特率 9600 bps、7 位数据位、EVEN 校验、1 位起始位、1 位停止位;4)mw 记录类型(record type)设计;5)记录支持(record support)开发;6)设备支持(device support)开发;7)IOC 调试运行。数字接口设备 IOC 程序设计时,选择了自研记录类型、记录支持和设备支持的方案。原始的 EPICS base 中并没有其对应的记录类型,因此开发了新的记录类型及相应的记录支持和设备支持,mw 记录类型定义如表 3 所示,不同的控制变量定义为不同的域(field),在<TOP>/src/Makefile 中添加 DBDINC += mwRecord,会生成<TOP>/include/mwRecord.h 文件,其中包含如表 3 所示的微波电源控制相关的结构体定义。设备支持程序开发采用了状态机跳转,即将微波电源的控制需求分解为若干状态,设备支持程序在多个状态中切换。

表 3 微波电源控制 EPICS 记录类型及结构体定义

Table 3 Definition of mw control

definition of record type for mw	definition of struct for mw
<pre>recordtype(mw) { include "dbCommon.dbd" field(Vmon,DBF_DOUBLE) { promptgroup(GUI_INPUTS) asl(ASL0) pp(TRUE) } field(FilaImon,DBF_DOUBLE) { promptgroup(GUI_INPUTS) asl(ASL0) pp(TRUE) }..... }</pre>	<pre>typedef struct mwRecord { char name[61]; /* Record Name */ char desc[41]; /* Descriptor */ char asg[29]; /* Access Security Group */ epicsEnum16 scan; /* Scan Mechanism */ epicsFloat64 vmon; /* HV Voltage Value */ epicsFloat64 filaimon; /* Fila Current Value */ char ip[16]; /* IP address */ epicsInt32 port; /* port */ } mwRecord;</pre>

2.4 上位机界面

EPICS 框架中用于界面开发的软件 CSS(Control System Studio)^[9]是 Eclipse 插件的合集,控制系统界面开发使用了该软件,包含离子源控制主界面、运行参数监测、安全连锁界面及 JavaScript 脚本的开发,离子源控制主界面如图 4 所示。

3 安全连锁设计

控制系统为了确保人员和设备的安全设计了严格可靠的安全连锁,基于物理需求,安全连锁规则如表 4 所示,需要指出的是,被控设备和阈值设定都开发了 Bypass 功能,当调束人员判定设备或者阈值出错的时候,可以通过 Bypass 旁路,使其不参与到安全连锁逻辑中,从而保持装置运行的连续性。

基于上述安全连锁规则,控制系统开发了安全连锁软 IOC,调用 dbGetLink 函数读取设备运行实时值,通过和

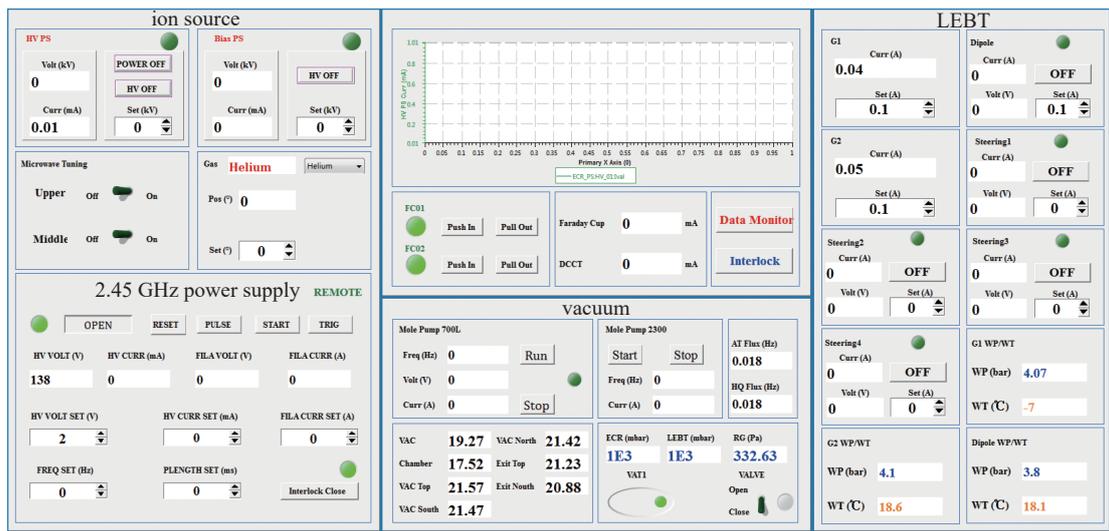


Fig. 4 Main OPI for JUNA ion source

图4 JUNA 离子源控制主界面

表4 安全连锁规则

Table 4 Rules of interlock protection

condition of interlock	action
$ecrVac > 1 Pa$ or $lebtVac > 1 Pa$ or $rgVac > 200 Pa$	bias HV, extraction HV, HV volt and curr of mw are set to 0, interlock of extraction HV opens, FC1 and FC2 push in
$biasCurr > 2 mA$	extraction HV, HV volt and curr of mw are set to 0, FC1 and FC2 push in
the temperature and pressure of the water are contrary to the thresholds	the solenoid power supply is set to 0, dipole power supply is set to 0 and off, FC1 and FC2 push in, mw interlock, molecular pump controller is set to off
enabled is false	bias HV, extraction HV, parameters of mw are set to 0, FC1 and FC2 push in
vacuum of accelerator is abnormal or stop beam is true	bias HV, extraction HV, HV volt and curr of mw are set to 0, interlock of extraction HV and mw open, FC1, FC2 push in, delay 200 ms, valve closes
dipole power supply is off or the readback of it is zero	FC1 push in

阈值条件比较给出相应的执行逻辑, 调用 dbPutLink 函数实现执行输出, 安全连锁界面设计如图 5 树状结构所示。当需要停止设备运行时, 将人工使能置为 False, 会自动关闭设备, 对运行人员非常方便。

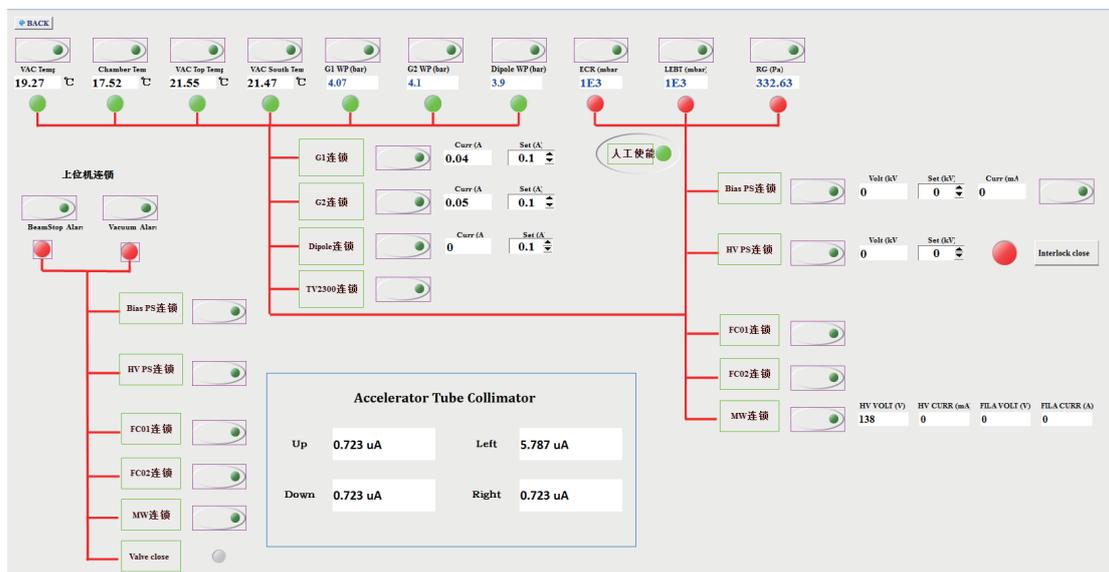


Fig. 5 Safety protection of JUNA ion source

图5 JUNA 离子源安全连锁

4 结 论

JUNA 强流离子源控制系统软件基于 EPICS 框架研制, 实现了设备分布式控制, 并且设计了严格可靠的安全连锁机制, 应用于国内首套深地实验强流 ECR 离子源, 自研了数字接口设备 IOC 程序, 包含自定义记录类型及对应的记录支持和设备支持, 使 IOC 的开发调试更加灵活并应用于其他粒子加速器的 EPICS 控制系统开发中。自投入运行以来该控制系统运行稳定可靠, 有效支撑了锦屏深地核天体物理实验的顺利进行, 尤其是关键核天体反应 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 的反应截面的直接测量, 将测量范围推进到世界最低能区, 并发现了一个新的共振, 解释了宇宙中已知最古老恒星 (SMSS0313-6708) 的钙丰度起源问题^[10]。后续需要改进的主要是: 1) 随着操作系统和 EPICS base 版本的更新, JUNA 二期中拟将 IOC 计算机操作系统升级为 debian11^[11], EPICS base 版本由 3.14.12.2 升级为 EPICS V7。2) 对连锁 bypass 功能限制人员权限且加入报警推送功能, 在正常开机时检查 bypass 状态并通过短信和邮件的形式提示运行人员。3) 将水状态采集和微波电源之间的连锁直接改为硬线连接方式并优化其他连锁逻辑。

参考文献:

- [1] Liu Weiping, Li Zhihong, He Jianjun, et al. Progress of Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics (JUNA)[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, 59: 642001.
- [2] Wu Q, Sun L T, Cui Baoqun, et al. Design of an intense ion source and LEBT for Jinping underground nuclear astrophysics experiments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 830: 214-218.
- [3] 马瑞刚, 崔保群, 李爱玲, 等. 锦屏深地强流高压加速器控制系统的研制[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(8): 1700-1706. (Ma Ruigang, Cui Baoqun, Li Ailing, et al. Development of JUNA high-current and high-voltage accelerator control system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(8): 1700-1706)
- [4] Yuan Chao, Zhang Wei, Ma Tao, et al. Design and implementation of accelerator control monitoring system[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34: 56.
- [5] 杨静, 杜焱焱, 叶强, 等. 基于导频技术的数字束流位置测量系统的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 084006. (Yang Jing, Du Yaoyao, Ye Qiang, et al. Development of digital beam position monitor system based on pilot tone technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 084006)
- [6] 刘功发, 李京祎, 李为民, 等. 合肥光源储存环控制系统[J]. *核技术*, 2004, 27(7): 501-505. (Liu Gongfa, Li Jingyi, Li Weimin, et al. HLS storage ring control system[J]. *Nuclear Techniques*, 2004, 27(7): 501-505)
- [7] 常建军, 原有进, 张玮, 等. 320 kV全离子综合实验平台控制系统升级[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(9): 1612-1616. (Chang Jianjun, Yuan Youjin, Zhang Wei, et al. Upgrade of control system for 320 kV heavy ion multidisciplinary research facility[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(9): 1612-1616)
- [8] 冯立文, 王天一, 贾豪彦, 等. 北京大学DC-SRF-II注入器光阴极驱动激光系统[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104016. (Feng Liwen, Wang Tianyi, Jia Haoyan, et al. Peking University's DC-SRF-II photoinjector drive laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104016)
- [9] 葛良, 张玮, 安石, 等. HIRFL-CSRm电源监测系统[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 025102. (Ge Liang, Zhang Wei, An Shi, et al. HIRFL-CSRm power supply monitoring system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 025102)
- [10] Zhang Liyong, He Jianjun, deBoer R J, et al. Measurement of $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ reaction suggests CNO breakout in first stars[J]. *Nature*, 2022, 610(7933): 656-660.
- [11] Yuan Chao, Zhang Wei, Yue Min, et al. The design of accelerator control network analysis system and its application[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2023, 7(2): 200-209.