

引用格式: 余珮炫, 周红霞, 万银祥. 基于 PLC 的 HL-3 装置中性束逻辑控制系统设计 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 152-158. YU Peixuan, ZHOU Hongxia, WAN Yinxiang. Design of logical control system of neutral beam injection on HL-3 tokamak based on PLC [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 152-158. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.17.

基于 PLC 的 HL-3 装置中性束逻辑控制系统设计

余珮炫[✉], 周红霞, 万银祥

(中国核工业集团公司核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘要: [目的] 中性束注入 (NBI) 是中国环流三号 (HL-3) 托卡马克装置重要的等离子体加热和电流驱动手段。NBI 加热系统是涉及真空、电力电子、机械、自动控制、气体放电等多学科、多领域的复杂系统。控制系统是 NBI 加热系统可靠运行的基本保证, 可实现对加热系统现场设备的远程控制、运行状态的实时监控和放电实验的逻辑控制。[方法] 根据 NBI 加热束线控制需求确定 PLC 系统的硬件配置, 组建了以西门子 S7-416 为主控制器, 以 Profibus-DP 网络和工业以太网为基础, 以光纤为传输介质的分布式 I/O 系统。采用组态软件 STEP7 实现硬件组态、通信连接和程序编写, 利用界面软件 WinCC 完成集中管理、过程监控和信息归档。[结果] PLC 系统能够实时监控现场设备状态, 与 NBI 控制系统进行数据交换, 指导现场设备稳定运行。此外, 图形化的用户界面使得实验过程可视化, 真空值、流量和温度的实时显示, 为实验运行人员提供了及时的状态信息。[结论] 整个 PLC 系统高效可靠, 重复性好, 具有良好的兼容性和可扩展性, 实现了对 NBI 束线现场设备的监测和控制。

关键词: HL-3 装置; 中性束注入; PLC; 现场总线; 实时监控

中图分类号: TL4; TL62+9

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0152-07

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.17

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Design of Logical Control System of Neutral Beam Injection on HL-3 Tokamak Based on PLC

YU Peixuan[✉], ZHOU Hongxia, WAN Yinxiang

(Southwestern Institute of Physics, China National Nuclear Corporation, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: [Introduction] Neutral beam injection (NBI) is an important means of plasma heating and current driving on HL-3 Tokamak. The NBI heating system involves multiple disciplines and fields such as vacuum, power electronics, mechanics, automatic control, and gas discharge. The control system is the basic guarantee for the reliable operation of the NBI heating system, enabling remote control of the field equipment of the heating system, the real-time monitoring of the running state, and the logic control of the discharge experiment. [Method] The hardware configuration of the PLC system was determined based on the requirement of NBI heating beamline, and the distributed I/O system was set up with Siemens S7-416 as the main controller, Profibus-DP network and industrial Ethernet as the basis, and optical fiber as the transmission medium. Configuration software STEP7 was used to realize hardware configuration, communication connection, and program writing, and interface software WinCC was used to complete centralized management, process monitoring, and information archiving. [Result] The PLC system can monitor the field equipment status in real time, exchange data with the NBI control system, and instruct field devices to work stably. In addition, the graphical user interface can realize the visualization of experiment processes and real-time display of vacuum value, flow rate, and temperature, providing timely state information for operators. [Conclusion] The whole PLC system is efficient, reliable, reproducible, well-compatible, and scalable, which can be used to monitor and

收稿日期: 2024-05-08 修回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“强流长脉冲负氢离子源引出束综合性能优化研究”(U19A20112); 四川省科技计划“负氢离子源中电子行为对负氢离子产生效率的研究”(2022JDRC0094); 西物创新行动计划“7 MW 中性束束线高功率离子源技术研究”(202301XWCX002)

control the field equipment of the NBI beamline.

Key words: HL-3 tokamak; neutral beam injection; PLC; Profibus; real-time monitoring

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

聚变能是一种绿色的可再生新能源。为实现聚变反应,需要将等离子体加热到数亿摄氏度高温,并稳态运行。在磁约束核聚变^[1-2]实验中,欧姆加热的局限性使得只能通过辅助加热手段^[3],来进一步提高等离子体的温度和压力,从而实现核聚变反应。

中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)加热^[4]是一种通过向磁约束聚变装置内注入高能中性粒子的方式加热等离子体的技术,由于其显著的加热效果,在磁约束聚变装置上得到了广泛应用。其基本原理是高能的中性粒子束注入到聚变装置,与等离子体电流发生碰撞,将能量传递给离子和电子从而达到提高等离子体温度的目的。此外,中性束注入还有改善等离子体约束、诊断等离子体参数、实现无感电流驱动^[5]和加料等作用^[6]。

兆瓦级 NBI 加热系统是 HL-3 装置^[7]离子温度达到 1.5 亿 °C 的关键。目前已经建造完成的第一条 NBI 加热系统^[8]设计功率为 5 MW,包含 4 个热阴极正离子源,其设计指标为 80 kV/45 A/5 s,通过放电调试,引出束流达到 36 A,加速电压 75 kV,离子束功率达到 2.4 MW,脉冲宽度 3 s^[9]。文章针对 NBI 加热系统分布式结构^[10]特点,根据 HL-3 装置物理实验需求 and 中性束注入加热实验运行特点设计了 PLC 逻辑控制系统,实现了对束线真空系统、冷却水系统和电源系统的运行过程监控、联锁和保护功能。

1 中性束系统控制要求

HL-3 装置 NBI 加热系统主要由计算机控制系统、电源系统、送气回路、真空抽气系统、冷却水系统以及强流离子源、真空方箱、中性化管道、长脉冲量热靶、吸附式低温泵^[11]、偏转磁体^[12]、漂移管道和刮削器等组成^[13],如图 1 所示。各个子系统功能独立,位置分散,但实验运行时又存在强烈的逻辑关系,控制系统以开放式、模块化为基础,采用分布式结构,实现 NBI 加热系统实验运行的操作和管理集中,控制和风险分散。

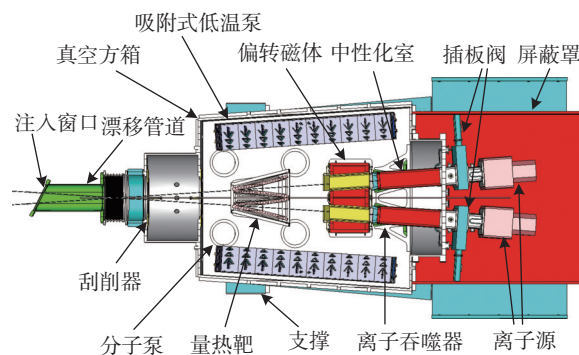


图 1 NBI 系统组成示意图

Fig. 1 Schematic of NBI system architecture

NBI 加热系统是脉冲运行,放电持续时间为 20 s,间隔约为 3 min。由于放电实验的主动送气和高热负荷特性,因此放电期间和非放电期间的控制要求和运行需求截然不同。非放电期间的连续过程是个非常慢的控制过程,如真空值、低温泵温度、水流量及温度的实时监测。控制系统需要协调好 NBI 加热系统中快慢过程的运行需求。

控制系统作为中性束注入加热束线的“大脑”,监控所有子系统状态^[14]并协调控制各个子系统的日常运行,它主要包括 PLC 逻辑控制系统^[15]、NI 时序快保系统、测量和数据采集系统、束诊断分析系统、数据处理分析系统等。PLC 逻辑控制系统作为控制系统的重要组成部分,主要实现真空抽气系统监控、冷却水系统监控、电源系统监控及参数设置、逻辑互锁、故障报警及保护。

PLC 逻辑控制系统应具备以下功能:(1)提供多种控制模式,调试模式和注入模式。调试模式是中性束系统单独调试模式,可以通过软件触发进行离子源引出锻炼、灯丝老练和送气标定;注入模式是中性束系统接收 HL-3 装置中央控制系统^[16]指令和触发信号,引出离子束,对放电等离子体进行注入加热;(2)实验放电前状态巡检,放电运行时的状态监控,实现状态互锁功能;(3)各个子系统间信号联锁保护,抽气泵组自动保护,故障报警;(4)电源设备的参数设置及远程操作;(5)提供良好的人机交互界面。

2 逻辑控制系统设计

NBI 系统在复杂电磁环境^[17]下, PLC 逻辑控制系统应满足抗干扰能力强, 稳定性好等特点, 同时兼顾到系统运行的易操作性、易维护性, 兼容性和可扩展性等多方面因素。因此, 逻辑控制系统以 PLC 为核心, 基于工业以太网和现场总线网络^[18], 实现灵活的组态和高速、方便、集中的分布式 I/O 控制。其网络结构如图 2 所示。

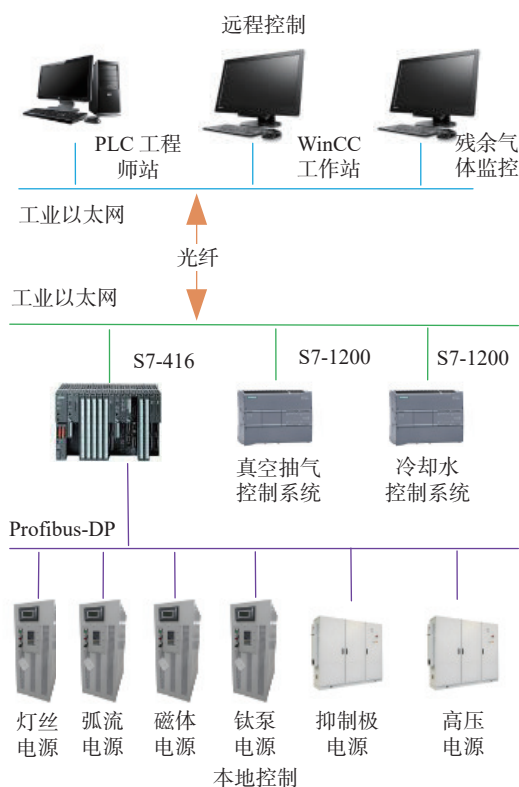


图 2 PLC 系统网络结构

Fig. 2 Framework of PLC system network

主控制器选用西门子 S7-400 系列 PLC, 其采用模块化结构, 性能优越, 环境适应性强, 并有很高的电磁兼容和抗冲击性能。真空抽气系统和冷却水循环子系统的控制器选用西门子 S7-1200 系列 PLC, 其体积小、成本低, 适用于简单控制任务。逻辑控制系统采用现场实验网和现场总线网实现控制设备间的数据通信。现场实验网是以工业以太网标准建立的封闭网络, HL-3 装置所有的子系统 PLC 控制器都要求接入其中, 可以快速的完成各个子系统之间的通信, 减少子系统间的物理接线。现场总线网是 Profibus-DP 通信网络, 该网络由 1 个主站和 23 个从站组成, 从站包括: 灯丝电源、弧流电源^[19]、偏转磁

体电源、抑制极电源、钛泵电源、高压电源^[20]。主控制器通过现场实验网接收子系统状态信号和实时数据, 通过现场总线网定时接收各从站状态消息和电源参数, 综合控制任务和系统状态向子系统和电源设备发送控制命令, 实现联锁保护。在一个放电运行周期对 NBI 加热束线现场设备和运行状态进行监视, 发现故障立即退出放电并报警, 运行保护程序保证加热束线部件的安全。真空抽气子系统和冷却水循环子系统都提供本地手动和远程控制模式切换功能, 子系统可单独运行, 也可以在主控制器的集中管理模式下运行。

所有控制设备都设置两层权限, 以防非实验人员的误操作。PLC 逻辑控制系统具有完善的状态监测、故障报警、自动保护和信息记录功能, 显示并记录所有状态报警、硬件报警和过程参数报警信息。且实时监测子系统和从站故障状态信号, 实现逻辑互锁。逻辑控制系统的网络搭建传输介质都采用光纤, 实现主控制器和子控制器以及从站的电气隔离, 并且所有工控机及 PLC 控制器供电采用隔离供电加 UPS 电源的模式。大大提高了整个系统的抗干扰能力和稳定可靠性。

3 逻辑控制系统硬件实现

根据逻辑控制系统所采用的测量元件和执行机构的信号类型、精度及接口形式, 选择合适的输入输出模块来完成现场信号的采集和处理。为保证真空系统的正常运行, 实时监测离子源和注入方箱的真空值及真空变化趋势, 记录放电实验送气过程和低温再生过程, 在束线不同位置安装了不同类型的真空计。其测控对象主要有 ZDF-5227 真空计、TM290 温度监视器、分子泵、罗茨泵、机械泵、气动阀、插板阀、电磁阀等, 信号类型包括串口信号、开关量信号和模拟量信号, 通信接口主要为串行接口。冷却水循环系统要对回路中水压力值, 水流量值、进出水温度和进出水电阻率等参数进行实时监视和记录。同时实现对循环回路的各阀门、变频泵监控。同时接地信号、钛丝电源转接信号、电源指令等都是开关量输入输出。

PLC 逻辑控制系统的硬件由电源模块、通信模块、CPU 模块、数字输入输出模块、模拟输入输出模块组成, 详细数量和类型列于表 1 中。

表 1 PLC 硬件组成
Tab. 1 PLC hardware configuration

模块名称	类型	数量
PLC CPU	CPU 416-3PN/DP	1
PLC CPU	CPU 1214C	2
PLC电源模块	24 VDC, 10 A	1
通信模块	CP441-1	1
模拟输入	8 AI, 14 bit	2
模拟输出	8 AO, 13 bit	2
数字输入	32 DI, 24 VDC	4
数字输出	32 DO, 24 VDC	4

为提高 PLC 逻辑控制系统的稳定性, Profibus-DP 现场总线网络采用星形连接方式, 主控制器和 Profibus-DP 集线器相连, 从集线器再连接到每一个从站, 从而保证了从站之间的独立性, 增加了整个 PLC 系统的可靠性和可扩展性。由于系统中各被控对象相对比较分散, 且很多涉及高电压、大电流, 因此很多控制信号都采用多模光纤传输。利用光发射模块(HFBR1414)和光接收模块(HFBR2412)研制了与 PLC 系统配套的光电/电光转换箱, 实现了光信号与继电器节点信号的相互转换。并且利用 Profibus-DP 光纤模块实现了双绞电缆线到光纤的转换, 也实现了 PLC 控制器与所有电源设备的光电隔离, 特别是高压电源。

4 逻辑控制系统软件设计

硬件是 PLC 逻辑控制系统的基础, 软件是硬件发挥控制功能的唯一途径。PLC 系统软件设计主要包括 PLC 控制程序和图形化人机交互界面。PLC 控制程序在西门子公司的 STEP7 平台下, 完成程序设计、硬件组态、通信连接和程序编写。

由于 NBI 加热系统的 4 套离子源运行状态相同但相互独立, 采用模块化的程序结构可提高软件开发效率, 增加软件可扩展性。首先, PLC 控制器进行系统自检, 确保 PLC 系统的正常运行。主控制器接收真空系统和冷却水系统状态信号, 进行状态巡检。随后, 选择需要投入的离子源和电源设备, 接受电源从站状态信号, 并对时序快保系统和接地状态进行巡检。所有状态满足后, 对电源运行参数进行设置并等待系统调试信号或者中控的触发信号。如果在放电周期发生故障, 时序输出复位, 电源系统立刻停

止运行, 质量流量控制器^[21] 停止送气。待满足所有状态条件后, 才可继续进行放电实验。在非放电周期才能对真空阀门、量热靶升降机、冷却水压力和流量进行调节。PLC 系统放电前的运行流程如图 3 所示。

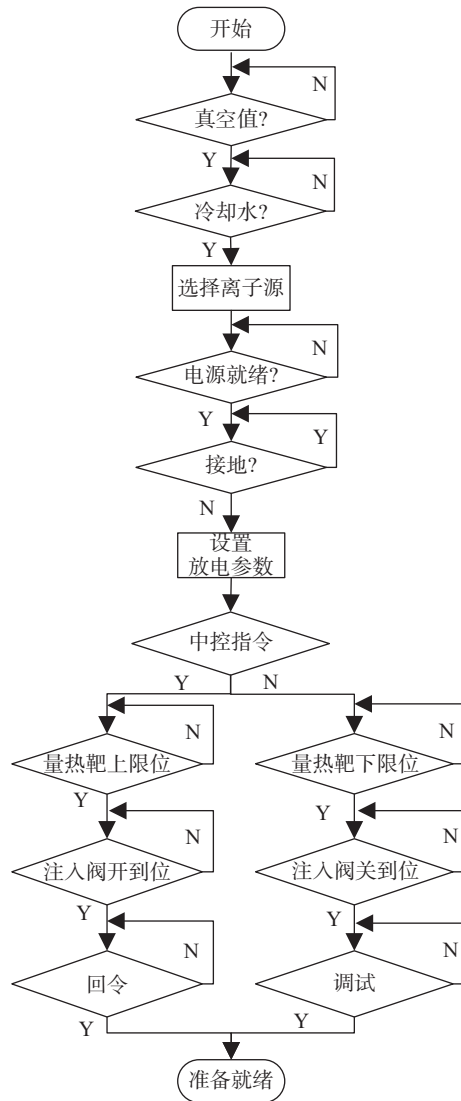


图 3 PLC 系统运行流程图

Fig. 3 PLC system operation flow chart

人机交互界面以西门子公司的 WinCC 图形软件为开发平台, 全图形化显示 NBI 加热系统状态信息和实验过程, 为实验人员提供良好的监控及操作界面。该界面具有如下功能: 系统状态显示、阀门泵组远程开关、运行离子源选择、电源参数设置、电压电流实时显示、真空值和低温泵温度值存储和趋势显示、故障监控及记录、运行模式切换、用户权限设

置等。

监控界面主要分为命令区、状态监控区、参数设置区和切换区。命令区主要为放电调试所需的指令和命令,包括控制模式选择,故障信号手动复位,电源设备选择命令框等。状态监控区涵盖所有电源

设备状态信号。参数设置区包括灯丝电源、弧流电源、抑制极电源、钛泵电源、偏转磁体电源和高压电源运行参数设置、实时电压电流显示和具体故障状态显示,如图 4 所示。切换区主要对状态监控区和参数设置区进行切换选择。

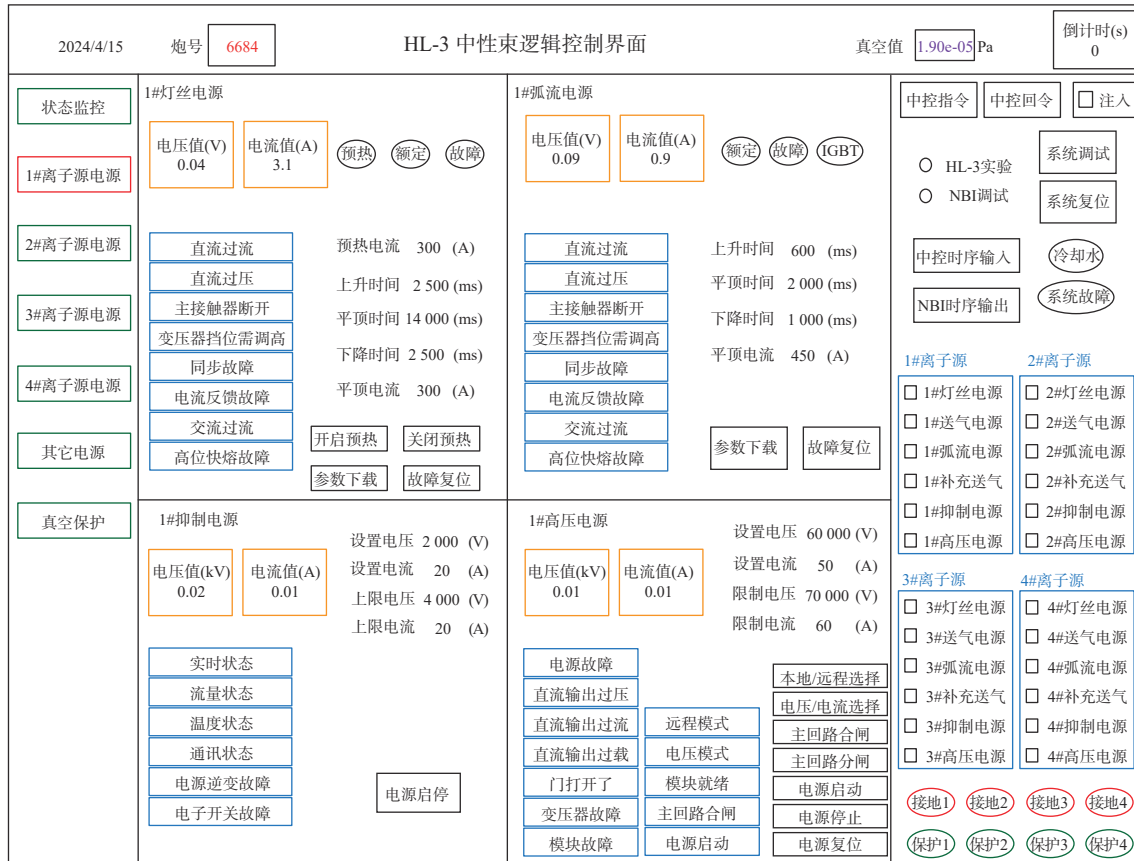


图 4 PLC 系统用户界面

Fig. 4 PLC system user interface

故障监控主要是对电源系统,真空系统和冷却水系统故障信号监测和 PLC 硬件故障诊断。按照故障等级对所有的故障进行分类:严重故障、一般故障和报警。故障类型可分为:设备故障和状态故障,针对不同故障事件分别进行预设的故障处理,并生成报警事件,给出声光报警及故障信息记录。

5 逻辑控制系统运行结果

PLC 逻辑控制系统已投入 HL-3 装置中性束注入加热实验运行,目前放电实验次数超 3 000 次,运行时长超过 4 320 h。实现了对 NBI 加热束线的真空系统、冷却水循环系统的状态监控和自动保护,以

及放电实验的逻辑互锁。

真空保护用户界面可以观察到抽气系统泵组、阀门等状态,低温泵液氮、液氮管路温度值,真空室水冷部件水流量,量热靶升降机位置信息等。并且将温度值和真空值进行了数据保存,通过趋势图可以看所有时间段的数据记录。综合考虑 NBI 注入实验所需放电气压,设定真空系统气压报警阈值为 5 Pa,且防止 HL-3 装置放电期间对真空计的电磁干扰,设定真空报警延时时间为 5 s。利用吸附式低温泵再生周期,对真空系统自动保护功能进行了测试,当真空值达到报警阈值后,通过电脑连接的音响发出急促的报警声,并关闭离子源插板阀;关闭抽气管

道插板阀、分子泵和前级阀, 从而起到保护分子泵的作用; 同时打开预抽阀, 从旁路对低温泵释放的气体保持一定的抽速。

通过电源参数界面设置好放电参数, 且整个系统状态正常, 等待放电指令, 随后进行离子源放电及束流引出。离子源典型放电波形如图 5 所示, 炮号 6078, 在灯丝和弧流运行稳定后, 投入抑制极电压, 引出高压, 获得了束能 60 keV、束流 20.6 A 的离子束, 脉宽为 500 ms。

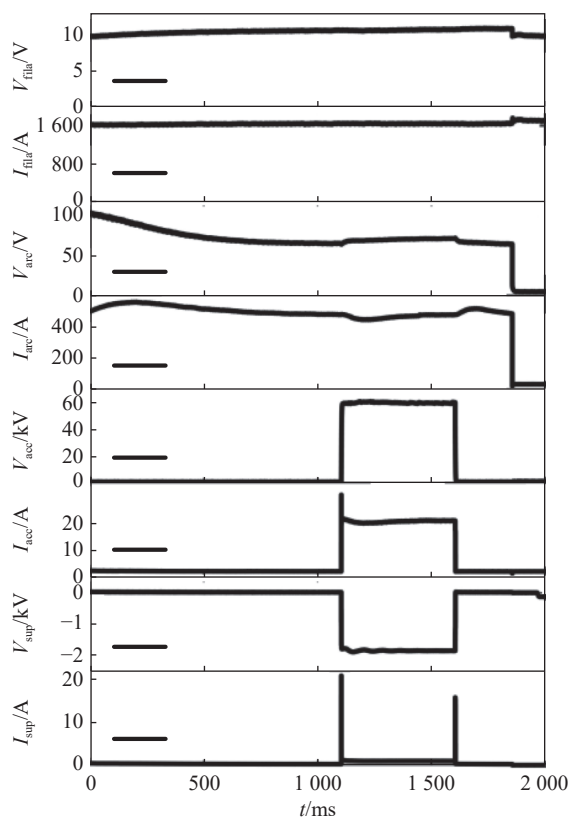


图 5 NBI 系统 1#离子源束引出波形

Fig. 5 Waveforms of beam extraction based on 1# ion-source of NBI system

6 结论

基于 Profibus-DP 网络和工业以太网的 PLC 逻辑控制系统, 实现了对 NBI 加热束线真空系统、冷却水系统和电源系统状态监控、远程控制和逻辑互锁。模块化的 PLC 系统具有良好的兼容性和可扩展性。基于 Profibus 通信协议的方式, 减少了系统物理接线, 扩充了传输信息量, 并易于故障的追根溯源。PLC 程序和人机交互界面共同实现了实验运行的逻辑

化、自动化和可视化, 便于实验人员的操作。NBI 加热系统的成功注入, 证明了基于 PLC 的中性束逻辑控制系统的可靠性、稳定性和可重复性, 在以后的实验中还需根据 HL-3 装置实验要求不断完善和改进。

参考文献:

- [1] 王腾. 超导磁体技术与磁约束核聚变 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 108-117. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.014. WANG T. Superconducting magnet technology and magnetically confined fusion [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 108-117. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.014.
- [2] 胡星光, 宋执权, 高格, 等. ITER 聚变装置及其电源系统 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 19-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002. HU X G, SONG Z Q, GAO G, et al. ITER fusion device and its power supply system [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 19-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002.
- [3] WESSON J. Tokamaks (3rd ed.) [M]. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [4] CAO J Y, WEI H L, LIU H, et al. Empirical scaling laws of neutral beam injection power in HL-2A tokamak [J]. *Chinese physics letters*, 2015, 32(5): 052902. DOI: 10.1088/0256-307X/32/5/052902.
- [5] ZHONG Y J, HUANG Q H, GONG X Y, et al. Electron cyclotron current drive under neutral beam injection on HL-2M [J]. *Nuclear fusion*, 2022, 62(12): 126027. DOI: 10.1088/1741-4326/ac948a.
- [6] 袁保山, 姜韶凤, 陆志鸿. 托卡马克装置工程基础 [M]. 北京: 原子能出版社, 2011. YUAN B S, JIANG S F, LU Z H. Fundamentals of tokamak device engineering [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2011.
- [7] ZHONG W L, HL-3 Team. China's HL-3 tokamak achieves H-mode operation with 1 MA plasma current [J]. *The innovation*, 2024, 5(1): 100555. DOI: 10.1016/J.XINN.2023.100555.
- [8] LIU H, CAO J Y, WEI H L, et al. The latest progress of the 1st NBI beamline on HL-2M tokamak [J]. *Fusion engineering and design*, 2017, 123: 448-452. DOI: 10.1016/J.FUSENGDES.2017.02.109.
- [9] 曹建勇, 魏会领, 刘鹤, 等. HL-2M 装置中性束注入加热系统研制进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(10): 106001. DOI: 10.11884/HPLPB201830.180051. CAO J Y, WEI H L, LIU H, et al. Latest progress of development of the neutral beam injection heating system on HL-2M tokamak [J]. *High power laser and particle beams*, 2018, 30(10): 106001. DOI: 10.11884/HPLPB201830.180051.
- [10] 刘胜, 汪永军, 宋士花. 分布式控制系统在中性束注入实验中的应用 [J]. *计算机测量与控制*, 2005, 15(3): 437-439, 451. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4598.2005.05.014.

- LIU S, WANG Y J, SONG S H. Application of distributed control system in neutral beam injection experiment [J]. *Computer measurement & control*, 2005, 15(3): 437-439,451. DOI: [10.3969/j.issn.1671-4598.2005.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-4598.2005.05.014).
- [11] YANG X F, CAO J Y, LIU H, et al. Cryopump development of the 5 MW neutral beam injector system on HL-2M tokamak [J]. *Review of scientific instruments*, 2017, 88(7): 073510. DOI: [10.1063/1.4994100](https://doi.org/10.1063/1.4994100).
- [12] 曹建勇, 周红霞, 刘鹤, 等. HL-2M 装置 5 MW-NBI 加热束线偏转磁体研制 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2017, 37(4): 411-417. DOI: [10.16568/j.0254-6086.201704007](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.201704007).
CAO J Y, ZHOU H X, LIU H, et al. Development of deflecting magnet for HL-2M 5 MW-NBI beam line [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2017, 37(4): 411-417. DOI: [10.16568/j.0254-6086.201704007](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.201704007).
- [13] CAO J Y, WEI H L, ZOU G Q, et al. Conceptual design of 5 MW-NBI injector for HL-2 M tokamak [J]. *Fusion engineering and design*, 2013, 88(6/8): 872-877. DOI: [10.1016/J.FUSENGDES.2013.03.034](https://doi.org/10.1016/J.FUSENGDES.2013.03.034).
- [14] LI B, LI L, FENG K, et al. The supervisory control system for the HL-2A neutral beam injector [J]. *Plasma science and technology*, 2009, 11(3): 374-376. DOI: [10.1088/1009-0630/11/3/23](https://doi.org/10.1088/1009-0630/11/3/23).
- [15] 宋士花, 盛鹏, 刘胜, 等. 中性束注入器离子源测试台可编程逻辑控制系统 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(6): 1635-1639. DOI: [10.3788/HPLPB20112306.1635](https://doi.org/10.3788/HPLPB20112306.1635).
SONG S H, SHENG P, LIU S, et al. Programmable logic controller system in neutral beam injector's ion source test stand [J]. *High power laser and particle beams*, 2011, 23(6): 1635-1639. DOI: [10.3788/HPLPB20112306.1635](https://doi.org/10.3788/HPLPB20112306.1635).
- [16] ZHOU J, SONG X M, ZHENG G Y, et al. The central control system for the first plasma campaign on HL-2M [J]. *Fusion engineering and design*, 2020, 155: 111565. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2020.111565](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111565).
- [17] 何峰, 曹建勇, 魏会领, 等. HL-2M 装置周边磁场分布及 NBI 束线磁屏蔽分析 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2017, 37(4): 385-391. DOI: [10.16568/j.0254-6086.201704003](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.201704003).
HE F, CAO J Y, WEI H L, et al. Magnetic field distribution surrounding HL-2M tokamak and magnetic shielding analysis for NBI device [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2017, 37(4): 385-391. DOI: [10.16568/j.0254-6086.201704003](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.201704003).
- [18] 肖军. DCS 及现场总线技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
XIAO J. DCS and fieldbus technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [19] YANG P Q, LIU B, ZHANG Y, et al. Design and preliminary experimental results of 5 MW-NBI arc power supply for HL-2M tokamak [J]. *Fusion engineering and design*, 2021, 172: 112728. DOI: [10.1016/J.FUSENGDES.2021.112728](https://doi.org/10.1016/J.FUSENGDES.2021.112728).
- [20] 周培海, 李青, 毛晓惠, 等. 脉冲调制高压电源高频化改造的仿真分析与实验 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2019, 39(1): 28-33. DOI: [10.16568/j.0254-6086.201901005](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.201901005).
ZHOU P H, LI Q, MAO X H, et al. Simulation analysis and experiment of high frequency transformation of pulse step modulation high voltage power supply [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2019, 39(1): 28-33. DOI: [10.16568/j.0254-6086.201901005](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.201901005).
- [21] 赵迪, 张征. 基于 Profibus-DP 现场总线的气体质量流量控制器设计 [J]. *自动化与仪表*, 2018, 33(12): 25-29. DOI: [10.19557/j.cnki.1001-9944.2018.12.006](https://doi.org/10.19557/j.cnki.1001-9944.2018.12.006).
ZHAO D, ZHANG Z. Design of gas mass flow controller based on Profibus-DP fieldbus [J]. *Automation & instrumentation*, 2018, 33(12): 25-29. DOI: [10.19557/j.cnki.1001-9944.2018.12.006](https://doi.org/10.19557/j.cnki.1001-9944.2018.12.006).

作者简介:



余珮炫

余珮炫(第一作者, 通信作者)

1990-, 男, 工程师, 主要从事中性束离子源运行和控制技术研究工作(e-mail) yupx@swip.ac.cn。

周红霞

1988-, 女, 工程师, 大连理工大学硕士, 主要从事中性束加热系统设计和技术研究工作(e-mail) zhouhx@swip.ac.cn。

万银祥

1994-, 男, 助理工程师, 主要从事中性束注入测量与控制研究工作(e-mail) wanyx@swip.ac.cn。

(编辑 徐嘉铖)