

文章编号: 1001-4322(2011)06-1635-05

# 中性束注入器离子源测试台可编程逻辑控制系统\*

宋士花<sup>1</sup>, 盛 鹏<sup>1</sup>, 刘 胜<sup>1</sup>, 汪根生<sup>2</sup>, 曾 岩<sup>2</sup>, 胡纯栋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 为实现对离子源测试台系统现场设备的实时监控, 设计了一套基于现场总线(Profibus)通讯协议的可编程逻辑控制器(PLC)系统。根据综合测试台测控要求确定 PLC 系统硬件配置, 组建单主站 Profibus-DP 网络实现高速分布式 I/O 系统。该系统实时监测现场设备状态并与中性束注入总控实时交换数据, 协调控制现场设备按序稳定运行。全图形化的人机操作界面实现了系统运行的可视化操作, 数据的实时存储和显示为物理操作人员提供了实验分析依据。整个系统控制稳定可靠, 重复性好, 兼容性及扩展能力强。

关键词: 离子源; 中性束注入器; 可编程逻辑控制器; 现场总线; 实时监测

中图分类号: TP273 文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20112306.1635

中性束注入器(NBI)系统是一套产生高能中性粒子束并将其传输到聚变装置 EAST 内用以加热等离子体的复杂系统<sup>[1]</sup>。强流离子源是大功率 NBI 系统最核心的核心部件, 离子源所能达到的性能决定了 NBI 所能达到的指标。EAST-NBI 离子源测试台是一个用于研究离子源性能指标的多功能实验平台。基于该平台, 既可针对 NBI 系统各部件进行性能测试和实验研究, 还可以开展与 NBI 加热、聚变装置第一壁等相关的高热流承载部件材料与结构的热力性能测试研究。本文针对综合测试台的分布式特点, 根据实验运行技术要求设计了 PLC 控制系统, 实现了对测试台实验运行过程的监控和保护功能。

## 1 离子源测试台测控要求

离子源测试台主要由强流离子源、测试台本体、真空抽气系统、供气系统、水冷却循环系统、电源系统、计算机测控系统等组成, 如图 1 所示。各子系统相对独立且物理位置分散, 测控系统采用分布式<sup>[2]</sup>控制系统结构实现系统的实验运行的集中管理分层控制。

强流离子源是大功率 NBI 系统最核心的核心部件, 离子源所能达到的性能决定了 NBI 所引出束的品质。电源系统良好的输出特性、真空系统提供的高真空环境及冷却水系统输出的高品质冷却水都是实验安全稳定运行的基本保证。

计算机测控系统是整个测试

台的控制核心, 巡检所有系统状态并协调控制各子系统运作, 它主要包括计算机数据处理系统、中央定时系统、数据采集系统、PLC 系统等。PLC 系统作为测控系统的重要组成部分, 主要实现低温真空系统监控、水冷循环

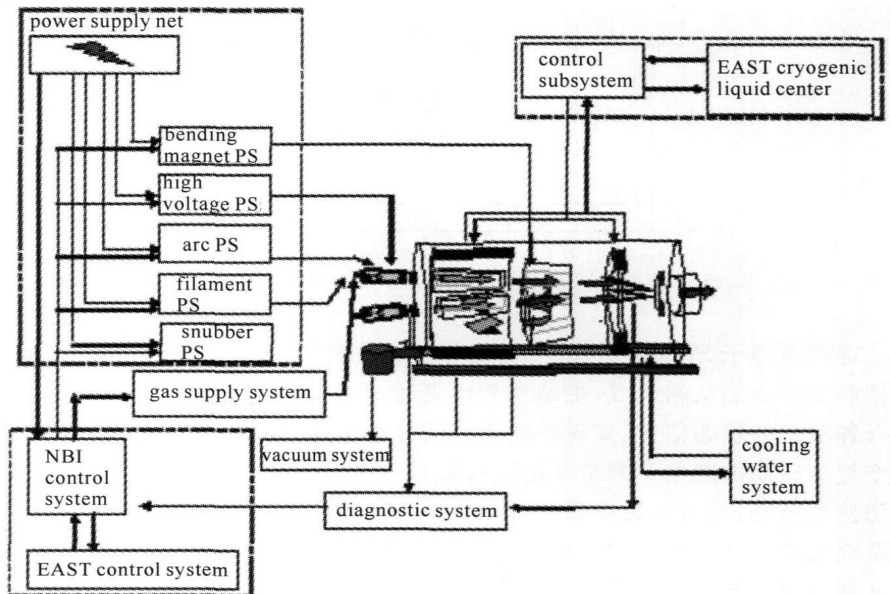


Fig. 1 EAST-NBI test stand diagram

图 1 EAST-NBI 综合测试台系统组成

\* 收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2011-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10875146)

作者简介: 宋士花(1980—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事中性束注入测量与控制研究; shsong@ipp.ac.cn.

系统监控、源头电源系统监控、故障报警及系统间的信号连锁与保护。

PLC 系统具体应具备以下功能:(1)提供多种控制模式,其中手动模式是指实验人员在一次实验中必须参与每个实验步骤并人工确定条件的满足性,自动模式是指实验按照预先设定的操作顺序和实验条件由 PLC 实现自动控制,放电时间间隔由实验人员确定。控制模式可分为远程手动/自动控制、现场手动/自动控制等;(2)实验运行前状态巡检,实现信号互锁功能;(3)系统间信号连锁保护,故障报警;(4)实现实验运行监控;(5)参数设置<sup>[3]</sup>,运行参数及报警参数设置;(6)运行数据的实时采集存储,并实现实时显示和历史数据查询功能;(7)提供良好的人机交互界面。

## 2 离子源测试台 PLC 系统设计

### 2.1 系统总体设计

PLC 系统在性能上还要满足控制可重复、运行可靠、扩展性强、兼容性好、抗干扰能力强及操作简单等实验要求。所以,PLC 系统组成建立以开放式、模块化结构为基础,使系统可以灵活、方便地实现复杂的编程和组态工作。本文根据离子源测试台测控要求选择了符合实验运行的 PLC 硬件配置,并组建 Profibus-DP 网络实现高速、方便的分布式 I/O 控制系统,其网络结构如图 2 所示。

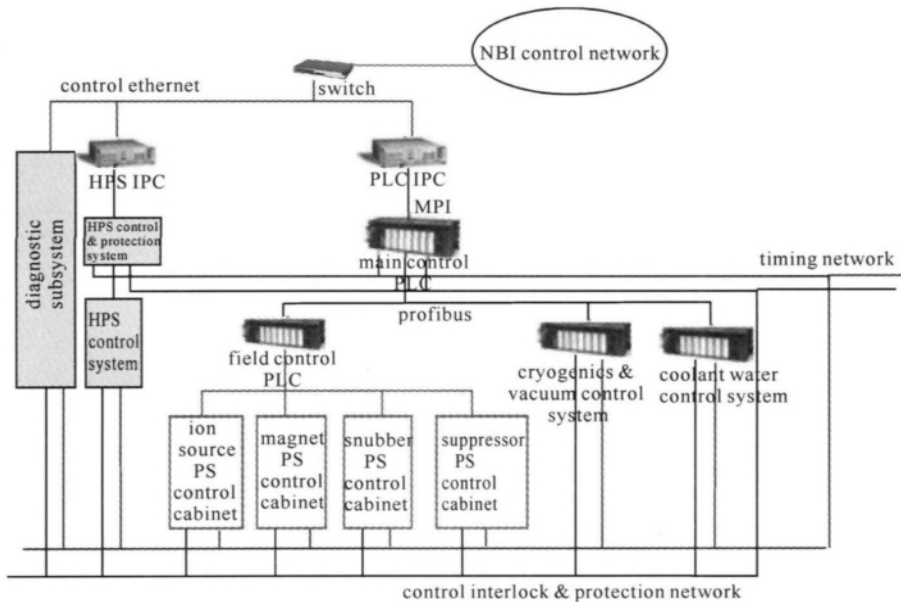


Fig. 2 Framework of PLC system network

图 2 PLC 系统网络结构

选用西门子 S7-300 系列 PLC 做为整个系统的核心,组成单一主站 Profibus-DP 通信系统。该系统由一个主站和 3 个智能从站组成,主站在 NBI 控制室内,通过 Profibus 总线与各分站进行数据交换。主站实时接受来自各从站的状态信号,实现系统间的信号连锁保护,根据控制任务结合系统状态向各从站发送控制命令。在一个控制周期内对整个网络状态进行监视,实现对系统内的各 I/O 模块的自诊断,发现故障立即进行控制模式切换并报警,及时发现故障并排除保证系统的安全稳定运行。3 个智能从站分别负责源头电源系统、低温真空系统及水冷循环系统的监控任务。各从站作为相对独立的监控站,提供本地手动和自动控制模式切换功能。各从站组成的分控系统可单独运行,也可以在主站的集中管理模式运行。

每个设备操作时均有权限制,以防非操作人员的误动。该系统支持完善的报警监测和管理功能,显示当前所有正在进行的过程参数报警和系统硬件报警。该系统实时监测各系统的故障状态信号,实现故障报警和信号连锁。实验现场与控制器之间信号通过光纤传输实现电位隔离,控制室内的上位工控机及 PLC 供电也采用隔离电源,实现与现场装置接地完全隔离。整个系统可靠性高,抗干扰能力强。其模块化结构和多种通讯接口,使得整个系统具有较好的扩展性和兼容性。

### 2.2 硬件系统设计

根据各子系统所采用的传感器、执行器的信号类型、精度和采样频率及接口形式选择合适的 I/O 模块实

现场信号的采集与处理,形成规范、有效的数据提供给主站。现场设备信号类型决定了 PLC 具体信号模块的选择。

对 NBI 真空系统而言,操作人员最为关心的重要参数是真空度和动态真空变化趋势。为保证真空系统正常运行,真空监控系统应实时监控主真空室内各点的真空度、实时监控低温再生过程。通过对低温泵运行模式的控制,实现对低温泵挡板与冷凝板温度的控制,并提供温度报警功能。其测控对象主要有真空压力、温度、阀门和泵等,主要的信号类型是开关量输入/输出和模拟量输入/输出。

为保证冷却水的品质,水冷循环监控系统要对给水温度、回水温度、给水电阻率、回水电阻率、给水含氧率、回水含氧率、水压力及水流量等品质参数进行实时采集监视。为保证冷却水系统的安全稳定运行,还要实现各阀门、实验运行泵、应急泵、维持泵和冷却塔水泵的监控。

源头电源监控系统需要对弧电源、灯丝电源、抑制极电源、磁场电源和进气电源<sup>[4]</sup>的时序和波形进行控制。通过模拟量输出模块实现对电源幅值及波形的设定,报警参数的设置,开关量输出模块实现各套电源的时序控制<sup>[5]</sup>。源头电源监控系统实时监测系统状态及故障信号状态,实现与真空系统和冷却水系统的信号连锁保护。

主控 PLC 实现多个束诊断测量系统采集的脉冲触发控制,状态监控;CCD 视频采集系统触发;各子系统故障信号的监测及故障综合;故障发生时,提供声光报警。

根据各系统信号类型及数量进行统计后,选择 PLC 信号模块,如表 1 所示。

表 1 PLC 硬件选型  
Table 1 PLC hardware configuration

model name	type	quantity
PLC CPU	CPU 317-2DP	2
PLC CPU	CPU 315-2DP	2
PLC power supply	24VDC,10A	4
digital input	32DI,24VDC	20
digital output	32DO,24VDC	25
analog input	8AI,12bit	30
analog output	4AO,13bit	25
storage card	MMC	4
communication card	CP5611	2

### 2.3 软件设计

硬件的选择是基础,监控系统功能实现要通过软件来完成。PLC 系统软件设计主要包括 PLC 用户程序和上位监控程序。采用西门子公司 Step7 软件作为开发平台实现各分控 PLC 控制程序的设计、硬件及网络组态<sup>[6]</sup>。PLC 系统监控信号流向如图 3 所示。

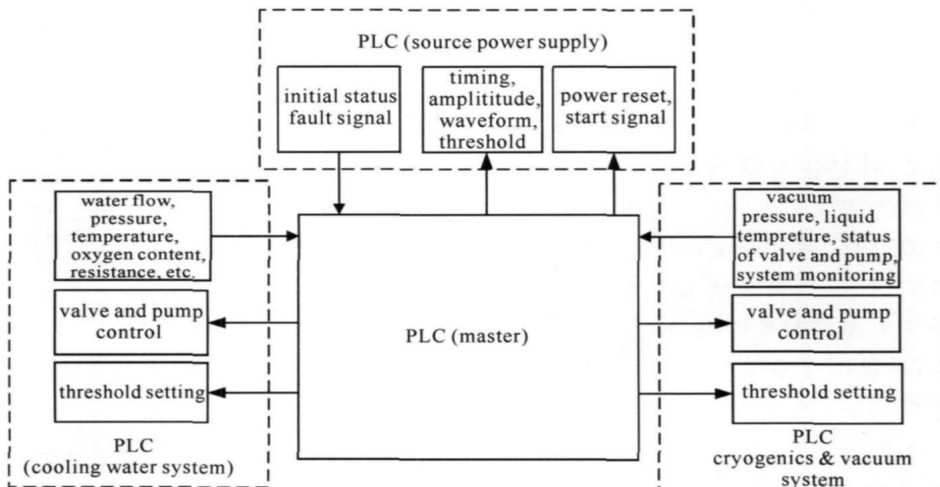


Fig. 3 Signal flow of PLC system

图 3 PLC 系统信号流向

首先,主从站进行系统状态自检测,确保 PLC 系统运行正常。其次,主站接收从站状态信号,对真空、电源

等系统的运行状态进行巡检。所有状态满足后,对时序、幅值、报警阈值等进行设置并等待总控的开始信号。如果存在故障,电源输出复位并将进气阀门关闭。所有状态满足要求后,实验才可继续进行。在一个控制周期结束后,可以通过对低温真空系统及冷却水系统的流量和压力进行调节。

上位监控程序以西门子公司 WinCC 为平台开发,全图形化显示过程顺序和状态条件,并为实验运行提供良好的人机交互操作界面<sup>[7]</sup>。该程序应具有如下功能:系统状态动态化显示、幅值和时序参数设置、实验运行控制、测量值存储和波形显示、故障监控、历史数据查询、用户及其访问授权管理等。首先运行主控制界面,实现用户登陆、实验任务选择、实验日志记录和运行模式选择等功能,并且通过主控制界面可实现多个界面的切换。在主控制界面的前提下,进行其它操作界面的设计。

具有合法操作权限的实验人员登录后,进入与其权限对应的系统状态监视界面。该界面对各系统的运行状态和重要参数进行显示,则根据实验任务进行实验运行模式设置,如果状态条件满足则可进行实验运行操作。通过参数设置程序对时序、幅值、波形和报警阈值进行设置。可通过上位程序实现对子系统泵和阀门的远程控制,以及流量和压力的调节。

故障监控包括通讯诊断、子系统故障信号监测和故障消息显示。所有故障进行故障等级分成 3 类:严重故障、一般故障和报警。当有故障发生时,根据不同的故障级别分别进行相应的故障处理,同时给出声光报警并对其进行记录。通讯诊断用于查明并清除 WinCC 和 PLC 系统的通讯故障,对通讯的连接状态、通讯卡状态、连接属性的站地址、网络段号、PLC 的 CPU 模块所在的机架号和槽号状态进行诊断。

### 3 实验结果

NBI 离子源测试台的源头电源监控系统和真空监控系统已经通过实验运行测试,并开始交付测试台正式实验运行。离子源起弧放电实验及真空抽气系统性能测试实验验证了监控系统的稳定性和可靠性,满足了实验的控制功能要求。

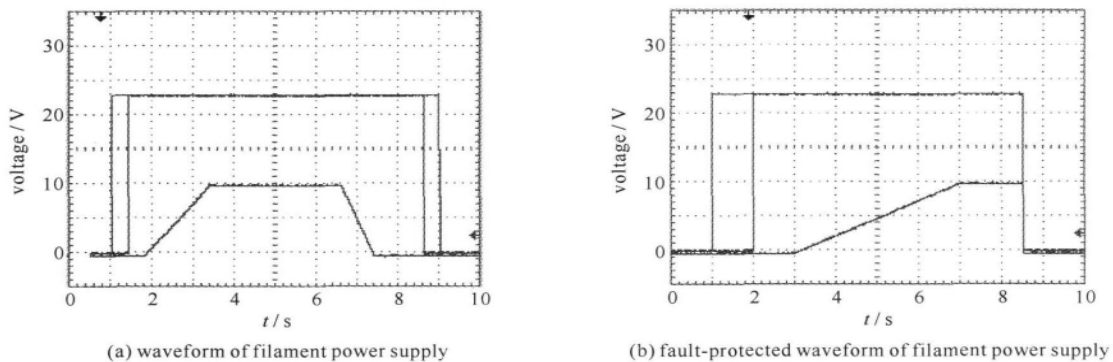


Fig. 4 Waveforms of PLC output in different test conditions

图 4 PLC 测试实验波形

通过台面实验对 PLC 系统的输出进行测试,测试结果如图 4 所示。图 4(a)是正常状态下灯丝电源控制信号输出,图 4(b)是有故障发生时,灯丝电源控制保护时信号输出。由图 4 波形可以看出,没有故障发生时,控制信号按照预设参数输出,一旦有故障发生则停止输出并等待故障排除。源头电源监控系统很好地完成了时序控制及故障保护功能,并证明了系统输出是可控和可靠的。PLC 系统与电源系统等联调完成离子源起弧放电实验,图 5 是起弧放电时采集系统测量得到的弧压、弧电流、灯丝电压和灯丝电流波形,通过该波形可以看出,PLC 系统很好地完成了对电源时序、幅值及波形的控制。

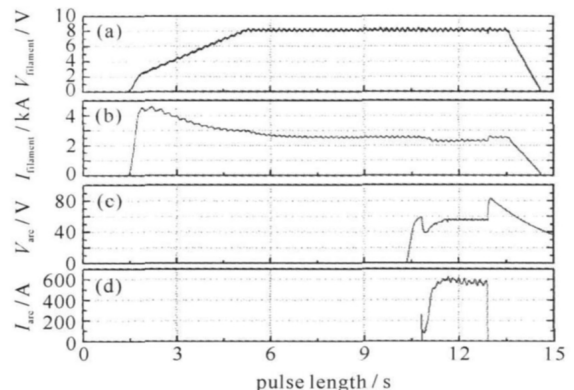


Fig. 5 Waveforms of arc charge experiment

图 5 起弧放电波形

## 4 结 论

随着 EAST-NBI 工程项目的逐渐推进, PLC 系统也同步完成了相应子系统的控制功能。PLC 系统的模块化结构使得整个系统具有一定的扩展性和兼容性, 便于今后的系统扩容。Profibus 通讯方式的选择, 解决了以往布线过多的问题并且实现了高速数据交换。下位 PLC 程序和上位监控程序共同实现了离子源测试平台运行的自动化和可视化, 便于物理实验运行人员操作。数据的实时存储和显示为实验运行提供了理论分析的依据。起弧放电实验的成功运行, 进一步证明了 PLC 系统具备一定的抗干扰能力且工作稳定可靠。PLC 系统结构还需根据实验要求不断变化进行完善和改进。

### 参考文献:

- [1] 卢杰, 张集泉, 钟光武, 等. HL-1M 中性束注入期间离子温度的变化[J]. 核聚变与等离子体物理, 1999, **19**(3):189-192. (Lu Jie, Zhang Jiquan, Zhong Guangwu, et al. Change of ion temperature during neutral beam injection in the HL-1M Tokamak. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 1999, **19**(3):189-192)
- [2] 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):437-451. (Liu Sheng, Wang Yongjun, Song Shihua. Application of distributed control system in neutral beam injection experiment. *Computer Measurement and Control*, 2005, **15**(3):437-451)
- [3] Wang Yongjun, Hu Chundong, Liu Zhimin, et al. Control system of neutral beam injection on HT-7[J]. *Plasma Science and Technology*, 2005, **7**(3):2822-2824.
- [4] Liu Zhimin, Hu Chundong, Liu Sheng, et al. The power supply system of ion source for NBI[J]. *Plasma Science and Technology*, 2005, **7**(3):2819-2821.
- [5] 宋士花, 刘智民, 刘胜, 等. 大功率 NBI 系统的 PLC 时序控制应用[J]. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(1):122-125. (Song Shihua, Liu Zhimin, Liu Sheng, et al. Application of PLC timing control in the neutral beam injector of HT-7. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2006, **26**(1):122-125)
- [6] 廖常初. S7-300/S7-400 PLC 应用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2005:307-350. (Liao Changchu. S7-300/S7-400 PLC application. Beijing: China Machine Press, 2005:307-350)
- [7] 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子 WinCC V6[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005. (Siemens Ltd., China, Automation & Drive Technologies. Explain the WinCC V6 of Siemens in a simple way. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005)

## Programmable logic controller system in neutral beam injector's ion source test stand

Song Shihua<sup>1</sup>, Sheng Peng<sup>1</sup>, Liu Sheng<sup>1</sup>, Wang Gensheng<sup>2</sup>, Zeng Yan<sup>2</sup>, Hu Chundong<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1126, Hefei 230031, China;

2. Institute of Mechanism and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Due to the real-time monitoring requirement of field devices in EAST-NBI ion source test stand, this paper introduces a programmable logic controller(PLC) system based on Profibus protocol. The hardware configuration of PLC system can be determined according to the requirement of test stand, a Profibus-DP network with single-master workstation make a distributed I/O system. The PLC system can monitor the field devices' status in real time, exchange data with NBI control system and instruct field devices work stably. In addition, full graphical user interface can realize the visualization of system operation, data storage and display in real-time, which will provide a basis for experimental analysis for physical operator. The whole PLC system is reliable, reproducible, well compatible and scalable, which can be used to monitor and control the field devices in EAST-NBI test stand.

**Key words:** ion source; neutral beam injector; programmable logic controller; Profibus; real-time detection