

# NBI 离子源源头电源控制系统研究与设计

陈长琦<sup>1</sup> 汪根生<sup>1</sup> 刘智民<sup>2</sup> 宋士花<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学真空科学技术与装备研究所 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

## Newly-Developed Power Supply Control Unit for Plasma Generator of Neutral Beam Injector

Chen Changqi<sup>1</sup>, Wang Gensheng<sup>1</sup>, Liu Zhimin<sup>2</sup>, Song Shihua<sup>2</sup>

(1. Institute of Vacuum Science and Technology and Equipment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract** A novel type of power supply automatic control unit of the plasma generator, dedicated to neutral beam injector (NBI) of TOKAMAK, has been successfully developed. The influence of the working environment of TOKAMA, such as the high electric and magnetic fields, strong radiation exposure, on the electronic devices of the power supply control unit was systematically studied. Moreover, the requirements, including the flexibility, ease of maintenance, stability of the control unit, were fully considered in the design. The original work includes the program design for the host computer monitoring and the programmable logic controller (PLC), and the design of the electronic circuits. In addition, the control unit provides an excellent human computer interface. Tested in the platform of ion source, the control unit significantly improved the efficiency of the plasma discharge. It may also be of technological interest in future design of the neutral beam line.

**Keywords** PLC, NBI, Ion source, Remote monitoring

**摘要** 中性束注入(NBI)加热被国际聚变界公认为最有效的加热手段,其离子源源头电源控制系统的研制是中性束注入器的关键技术之一。通过研究高电压、高磁场环境对控制系统的影响,综合系统灵活性、易维护性、稳定性等诸多方面因素设计了离子源源头电源控制系统,并开发了上位机监控程序、PLC程序和相关的硬件接口电路以及现场模糊控制系统。离子源源头电源控制系统为用户提供了良好的人机操作界面,经在测试平台的离子源起弧实验证明,有效地提高了NBI离子源放电实验的效率,为今后的NBI束线装置工程设计和研制奠定了基础。

**关键词** PLC 中性束注入 离子源 远程控制

中图分类号:TP277 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1672-7126.2011.04.11

中性束注入(NBI, Neutral Beam Injector)加热等离子体是提高托卡马克离子温度的一种有效方法,其在核聚变研究装置的等离子体加热、磁约束改善、无感电流驱动及加料方面均占有重要地位。设计应用于NBI器离子源源头电源控制系统。为了满足NBI起弧放电的要求,需要对灯丝电源、弧电源、抑制极电源、偏转磁场电源以及等离子体电极电源等进行实时控制,同时对所有电源状态、冷却水、真空、低温等实验条件按一定逻辑关系进行状态扫描监控,从而确保

系统在满足实验要求的条件下安全可靠地运行。

本文设计研究分析了国外的JI-60、DIII-D等装置的控制特性,结合国内控制系统功能特点组建电源控制平台,平台采用SIEMENS 317-2DP PLC作为控制主体,实现了系统状态巡检、真空检测、数据采集、时序控制、参数预设、系统状态监控和报警处理等功能,从而提高了系统的稳定性、安全性及其执行效率,达到了预期的设计目标,为NBI的工程设计提供了依据。

收稿日期:2010-09-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(17575105);国家自然科学基金资助项目(11075183)

\* 联系人: Tel: 13856005101; E-mail: wgs0215@163.com

### 1 控制系统研究

NBI 加热是利用强流到托卡马克等离子体中, 并通过电荷交换和粒子间的碰撞来加热和驱动等离子体。作为关键部件的离子源源头电源控制系统主要研究两个方面内容, 一是通过测试平台研究离子源的起弧放电过程中相关实验电源的运行控制, 同时测试等离子体发生器电源包括灯丝电源、弧电源、抑制极电源、探针电源和气阀电源等的时序逻辑; 二是研究控制系统的负载特性, 包括抗干扰性、响应时间和稳定度等, 使其达到工程设计的不要求。

### 2 控制系统设计与实现

为了达到控制系统设计要求及相应功能, 从软硬件组建、人机界面的编译、关键技术的实现等三个方面进行了系统方案设计与技术实现。

#### 2.1 软硬件的组建

硬件部分, 采用了西门子 317-2D 型 PLC, 该型号 PLC 具有性能价格比高、扩展性强、组网简单等优点, 配合模拟量输入模块 (SM331)、数字量输出模块 (SM322) 及数字量输入模块 (SM321) 搭建控制核心部分。考虑到起弧放电是由多个子系统同时运行, 高频电磁干扰非常严重, 以等离子体电极电位作参考电位, 其悬浮电位高达 100 kV, 因此必须采取有效的措施来屏蔽电磁干扰。设计中采用隔离接口电路 (光电耦合隔离和光纤隔离) 实现电位隔离, 隔离等级为 120 kV DC, 从而解决电磁干扰和信号远距离传输的问题。

上位机选用 AD Link 的工控机, 内置 Siemens 5611-Profibus 通讯卡, 负责提供电源系统全部监视界面、报警机制和数据分析。为保证数据的实时性, 上下位机之间及现场真空规管 (Inficon BCG 450) 间的通讯使用 Profibus 总线, Profibus 总线是一种高速低成本通信协议, 传输速率达到 12 Mbit/s, 从而保证了现场系统间的实现数据交换。采集的数据保存到上位机本地硬盘, 同时通过网络传输把数据备份到数据服务器。现场安装了西门子触摸屏 (TP177B), 对状态进行本地监控, 以便及时发现故障。

软件方面, 下位机采用西门子的 Step7, 具有简易、直观、功能强等特点; 上位机选用的 WinCC (Windows Control Center) 是 Siemens 公司开发的一种功能强大的工业控制软件, 是“真正开放的”HMI SCADA 软件。它是第一个使用最新的 32 位技术的过程监

视系统, 具有良好的开放性和灵活性, 其抢先式多任务的特点适合于对过程事件的快速反应。

为满足实验及远程监控的要求, 设计采用分布式控制, 电源测控 PLC 通过 Siemens 5611-Profibus 连接到总线上和水冷控制、真空监控、触摸屏 TP177B 等子系统构成从站, 从而大大提高了网络化, 便于实验人员的管理和操作。网络构成如图 1 所示。

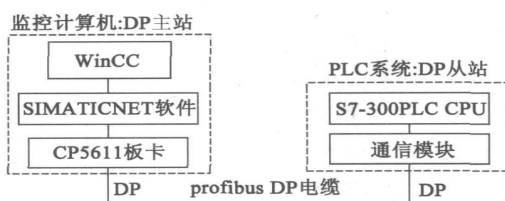


图 1 Wincc 与 S7-300 系列 PLC 通讯硬件连接

Fig. 1 The hardware connection of Wincc and S7-300 series PLC

#### 2.2 人机界面的编译

上位机编写的人机界面主要包括巡检、时序触发、过程监控、参数设置、报警、连锁保护、故障处理等。其中巡检量设定为 6-7 个, 主要有对冷却水温度、真空度、进出水压、灯丝状态等的检测, 在实验开始之前对初始状态和故障信号巡检, 确保工况完备以及实验的顺利进行, 系统运行框图如图 2 所示。

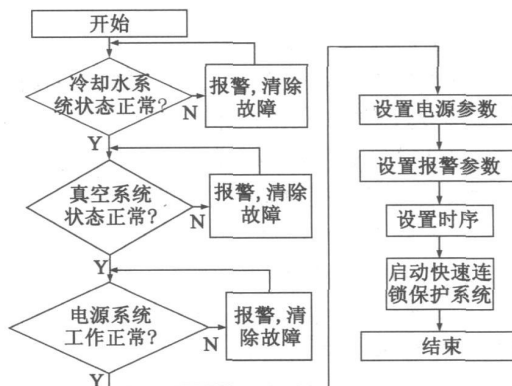


图 2 系统运行框图

Fig. 2 The flow chart of system operation

目前, NBI 装置都是以脉冲方式运行, 脉冲持续时间为数秒至数十秒, 因此系统要求有着良好的定时精度。本系统对于各电源的时序设置了统一的零时刻, 定时精度控制在 1 ms 量级, 时序触发以及各信号的脉冲宽度由 PLC 通过内置定时器完成。操作人员只需通过上位机界面的时序设定, 就可实现各个部件

的高精度定时触发和脉宽调节。为了对触发的先后时间有直观的了解,系统绘制了波形示意图,可以根据数据的变化直观反映时间的变化,如图 3 所示。

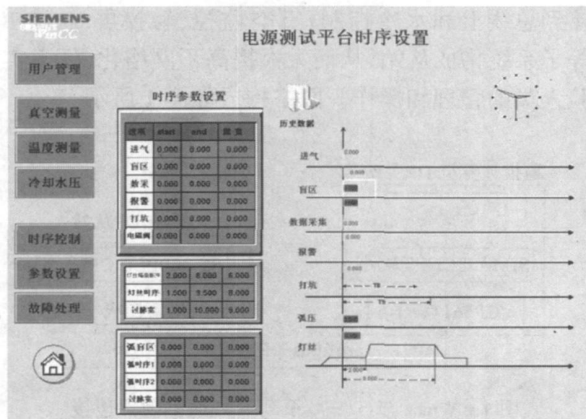


图 3 电源测试平台时序设置界面

Fig 3 The timing setting interface of the power supply test platform

在数据处理方面,系统能够提供实时数据存储和处理功能,后期可通过访问 Wincc 的数据库,调用相关数据分析。对实验中涉及的关键时序和过去放电炮号可以通过历史数据进行查询。

参数设置主要是对灯丝电压、爬坡时间、下降时间、弧电压、进气量等相关参数进行设定,结合报警及连锁保护保证实验的顺利运行。故障处理主要由报警记录和报警处理两部分组成。报警可以通知操作员在实验过程中发生的故障和错误信息,用于及早警告临界状态,避免停机或缩短停机时间。报警记录主要负责过程值的监控、控制报警输出、管理报警确认。经过报警对事件处理,恢复系统正常运作。而当系统报错时,故障处理能够对报错量进行确定和提示,主要包括电源输出过压、过流、真空报警、温度报警等,并可在控制面板及触摸屏上逐一显示。对重要的控制变量,如:灯丝电源、弧电源、抑制极电源等,程序加了嵌套保护,并连接到总控上。当变量出现故障或超出正常工作范围,子系统会自动启动保护程序,根据事件的错位等级做出响应。如果出现严重错误,系统自动将变量置零同时切断电源,现场发出警报。上位机对于灯丝电压上升沿输出和弧电压输出做了实时的动画显示,如图 4 所示。采样精度为 500 ms,操作人员可以通过界面观察变量的实时变化。

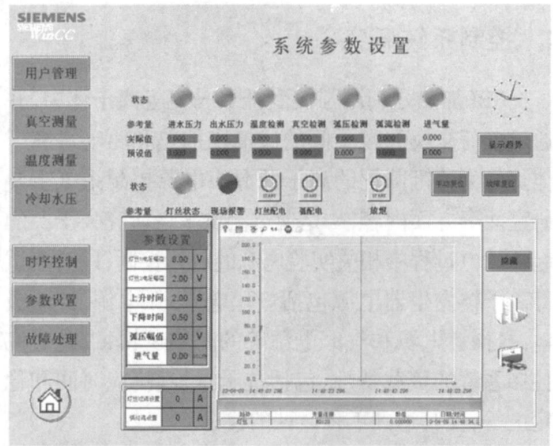


图 4 电源测试平台监控界面

Fig 4 The monitoring interface of power supply test platform

### 2.3 关键技术的实现

**灯丝电压爬坡:**离子源灯丝电源的负载为钨灯丝,为了延长灯丝寿命,控制灯丝电压按照要求的任意波形上升,主程序编译了频率发生器,可产生 50 Hz 的方波信号。灯丝电压的爬坡运用了加减计数器,时间转换等功能模块,从而实现上升时间和坡度可调的爬坡电压信号。

**幅值设置及模数转换:**为了方便用户操作,模拟量采用系统模块 FC105, FC106 进行模数转换,用户只需在上位机参数设置界面中输入实际的电压或电流值,通过下位机将数值转换为 D/A 卡上的模拟电压值,经线性光隔离输送到装置现场,实现实验参量预设,从而达到数据与电信号的匹配。由于系统运行处于高电压、高磁场及高辐射的环境中,这些对传统的 A/D 芯片干扰十分严重,这其中主要包括 1 MHz 和 100 kHz 的衰减振荡波干扰等,因此设计采用了光纤传输并且运用了新型压频变换器 VFC110 模块, VFC110 运用光电隔离避免了干扰同时有效的提高模数转换的精度。

**多级响应机制:**为了使系统高效安全的运行,在程序运行过程中进行实时安全巡检和设立多级嵌套保护措施,对变量分级处理。在保证器件安全的情况下,对关键等级不同的报警采取不同的响应机制。

### 3 实验结果

通过测试平台在实验运行时对灯丝电压、弧电压等关键指标的测量及误差分析,表明系统满足了设计要求。在稳定性、安全性及执行效率方面得到了有效提高。定时触发精度缩短为毫秒量级,而输

出电压幅值的误差控制在最高幅值的  $\pm 0.5\%$ 。同等条件下经多次放炮验证, 控制系统有较好的可重复性。图 5 为数据采集系统对其中一炮的截图。截图中设置灯丝电压为 8 V、弧电压为 60 V, 灯丝电压在可控范围内线性攀升, 平顶电压稳定; 弧压输出满足实验要求, 触发响应精准。同时冷却水温度、真空度、进出水压、灯丝状态等巡检量均能有效地起到报警和对系统的保护功能。

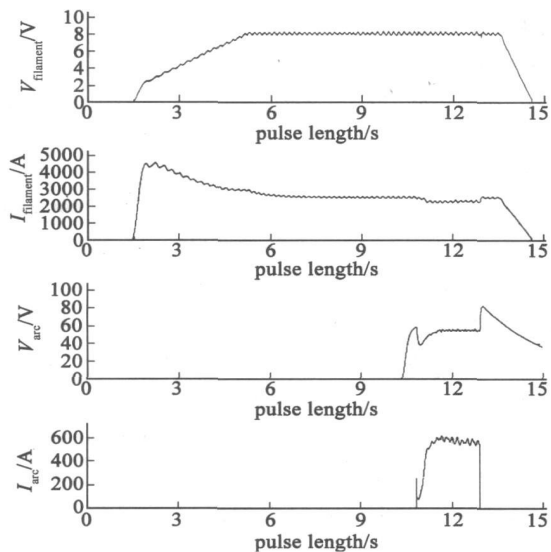


图 5 起弧放电实验截图

Fig. 5 The Screenshot of the arc discharge

## 4 结论

基于 PLC 控制系统的硬件电路及软件设计已经成功地运用到 NBI 离子源源头电源测试及离子源起弧实验中, 并且取得了较好的成果。该系统保障了实验装置的安全运行, 良好的人机界面和便利的操作环境, 极大地方便了实验人员的工作, 有效地提高了 NBI 离子源放电实验的效率。NBI 离子源源头电源控制系统研究与设计工作为下一步的 NBI 工程设计与研制奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] 卢杰, 张集泉, 钟光武, 等. 核聚变与等离子体物理[J], 1999, (3): 63-66
- [2] 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, (1): 122-125
- [3] Liu Sheng, Wang Yongjun, Song Shihua. Application of Distributed Control System in Neutral Beam Injection Experiment[J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(5): 39-41
- [4] Zuo Guizhong, Hu Jiansheng, Luo Nanchang, et al. Bench Test of Lithium First Wall in HF 7 Tokamak[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2010, (3): 58-63
- [5] 刘胜. 中性束注入控制系统设计[C]. 中国物理学会 2004 年秋季学术会议, 2004
- [6] 于浩洋. PROFIBUS 现场总线概述[J]. 自动化与仪表, 2002, (2): 18-21
- [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 S7 300(第二版)[J]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005
- [8] 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(第二版)[J]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005
- [9] Zhu Wu, Yang Daoye, Liu Zhiming. The Design of Remote Data Acquisition System in NBI[J]. VACUUM, 2004, (6): 46-49
- [10] Liu Z M. Design of the Control System for the Neutral Beam Injection in HF-7[C]. 23rd Symposium on Fusion Technology, 2004
- [11] Liu Zhimin, Hu Chundong, Liu Sheng, et al. The Power Supply System of Ion Source for NBI[J]. Plasma Science & Technology, 2005, (3): 25-27
- [12] Yang Luming, Lei Yajun. Application of Configuration Software WinCC in Automation Monitor System[J]. Computing Technology and Automation, 2003, (4)
- [13] 罗飞路, 康中尉, 胡庆云, 等. 基于 VFC110 压频变换的数据采集系统[J]. 国外电子元器件, 2001, (3): 3-5
- [14] Cui Yunkang, Zhang Xiaobing, Lei Wei, et al. Mass Spectroscopy Study of Residual Gases in Vacuum Electronic Devices and Its Storage Lifetime[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2007, (1): 85-88