

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0033-05

## 在线同位素分离器(BRISOL)电源控制系统的研制

马瑞刚, 崔保群, 黄青华, 马鹰俊, 唐兵, 陈立华

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 北京放射性核素装置在线同位素分离器 (BRISOL) 是串列加速器升级工程项目中放射性核束的产生与注入部分。它是质量分辨率为 1/20 000, 能够产生多种放射性核素的物理实验终端。该装置的电源控制系统是在 PLC(Programmable Logic controller) 框架下构建的基于以太网的分布式控制系统。详细介绍了控制系统的基本结构和工作原理、各种电源的控制方案、安全连锁设计、解决干扰的措施、图形化控制界面的软件设计和数据存储方法。该控制系统已经投入使用, 工作稳定可靠。

**关键词:** BRISOL; 控制系统; 接口; 安全连锁; 抗干扰

**中图分类号:** TL503.6      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.33

### 1 引言

中国原子能科学研究院建成了一套具有高质量分辨率的北京放射性核素装置在线同位素分离器 (Beijing Radioactive Ion-beam Facilities Isotope Separate On-Line, BRISOL), 能够提供多种能量 (100 ~ 300 keV)、强度在  $10^{11}$  particle/s 的放射性同位素。该装置中电源种类多, 如何选取电源控制接口与控制系统连接, 且要保证控制对象的响应时间和控制精度, 对电源控制系统的结构和软件设计提出了严峻的要求。在加速器装置中, 高压区域离子源打火是不可避免的, 打火放电产生的电磁干扰影响设备和控制系统的正常工作甚至损坏, 必须采取有效的措施消除影响, 保证高压区域附近电源设备和控制系统稳定可靠的工作。

该装置中的电源主要包括后加速高压电源、透镜电源、导向电源、磁铁电源、磁铁垫补电源、加热电源等。由于后加速高压电源、磁铁电源和加热电源技术指标的特殊要求 (例如: 300 kV 正输出高压电源稳定性和电压输出纹波好于 10 ppm), 控制系统中的模拟量不能实现高稳定度的技术指标, 必须选择数字通讯接口。许多电源设备为标准产品, 通讯控制接口无法实现统一, 相应地增加了控制系统硬件成本以及软件开发的难度和工作量。其余电源使用模拟接口和开关量实现控制功能。由于电源数量众多, 分布范围广的特点, 电源控制采用基于以太网的分布式控制系统。

### 2 控制系统基本结构

在线同位素分离器装置分为靶源段、第一分析段、转换段、主分析段、爬升段和低能束流段。靶源段和第一分析段分别处于 350 和 300 kV 两个电位, 其余束流线位于地电位。加热电源和中间电极电源放置到 350 kV 高压平台, 50 kV 高压电源位于 300 kV 高压平台, 300 kV 高压电源置于地电位, 2 台第一分析磁铁电源位于 300 kV 高压平台, 2 台主分析磁铁电源放置到主分析段, 3 台高稳定度稳流电源用于爬升磁铁和开关磁铁, 其它电源沿束流线分布式放置。

根据该装置的特点和电源分布情况, 设计的电源控制系统如图 1 所示。控制系统采用工业以太网和现场总线相结合的控制方式, 整个控制系统是由控制层、操作层构成, 控制层是由分布式的 PLC 控制系统实现现场设备的控制和显示, PLC 主机架和控制机架之间使用 Profibus DP 现场总线实现数据交换, 控制层和操作层之间通过工业以太网实现控制室计算机和现场 PLC 之间的数据通信, 为了加强网络抗电磁干扰能力, 增加传输距离以及消除电位差异, 部分系统采用光纤作为网络传输介质<sup>[1]</sup>。

BRISOL 电源控制系统使用 4 个西门子 S300 主控制器, 2 个用于高压平台上设备的控制, 即: 1 个 CPU315-2DP 置于 350 kV 高压平台, 1 个 CPU317-2DP 置于 300 kV 高压仓内电源控制, 另外 2 个 CPU317-2DP 控制器用于地电位电源设备控制。

收稿日期: 2014-09-09; 修改日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11227804)

作者简介: 马瑞刚(1971-), 男, 北京房山人, 高级工程师, 学士学位, 从事电子学和自控研究; E-mail:rgma@ciae.ac.cn.

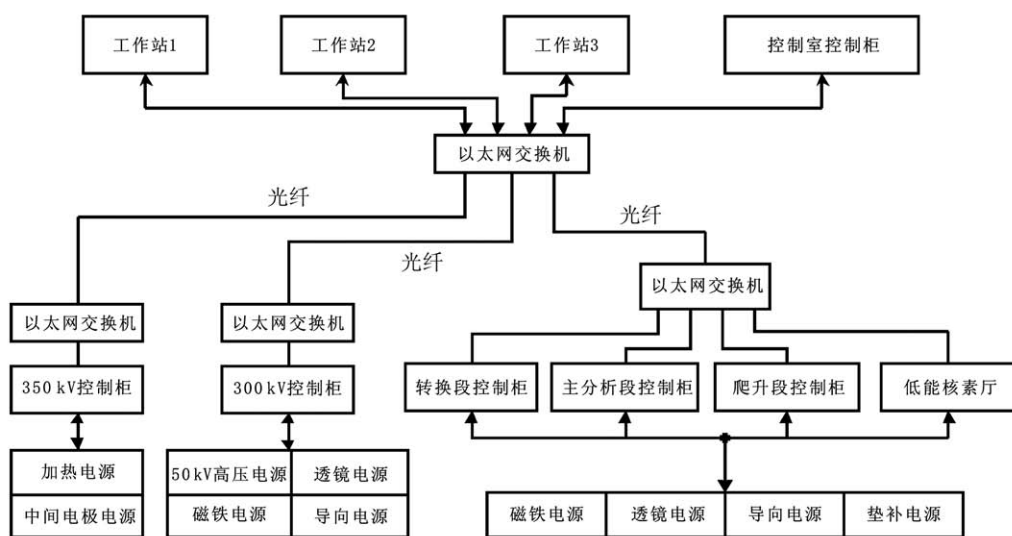


图 1 电源控制系统原理图

控制系统主控部分完成设备的控制、数据采集和安全连锁。操作员站作为系统的人机界面完成非周期性数据访问，如数据读取、系统配置、故障诊断等，选用工业级以太网交换机提高控制系统的可靠性。弱化上位机的控制功能，相应加强上位机的实时监控功能，可以保证系统运行免受不稳定因素影响。即使不开上位机系统，现场控制系统可以自动运行。

### 3 电源控制接口

在线同位素分离器装置中使用的电源设备主要有 2 台用于离子源加热的稳功率电源；7 台高稳定性磁铁电源，用于粒子种类鉴别和偏转；122 台透镜和导向电源，完成粒子束聚焦和改变粒子的运动轨迹；2 台高稳定性、低纹波的高压电源实现粒子束加速，确保该装置高质量分辨率的要求。下面详细地介绍各种电源的控制接口，保证电源稳定可靠的工作。

#### 3.1 数字通讯接口控制方案

50 kV 4 mA 高压引出电源和 300 kV 4 mA 高压加速电源的技术参数是实现该装置高质量分辨率的重要设备。其中 50 kV 高压电源的稳定度和高压输出纹波 ( $V_{p-p}$ ) 好于 100 ppm, 300 kV 高压电源的稳定度和高压输出纹波 ( $V_{p-p}$ ) 好于 10 ppm, 且本控和远控的输出电压设定和显示精度是 1 V, 输出电流的显示精度 0.1  $\mu\text{A}$ , 只有采用数字通讯接口的控制方式<sup>[2]</sup>才能实现显示和控制精度。50 kV 高压电源提供的是 RS232C 标准接口, 300 kV 高压电源可以选择 Profibus 和 RS422 通讯接口, 基于性价比的考虑, 选用 RS422 通讯接口, 为避免高压打火造成电源或控

制系统故障, 通讯接口硬件采用光纤隔离措施。

同样, 在线同位素分离器装置中磁铁电源的稳定度是  $\pm 3$  ppm/8 h, 在纯电阻负载条件下的输出电流纹波好于 100 ppm, 输出电流的设定分辨率是 4 ppm, 显示分辨率是 15 ppm, 电源通过嵌入式 CPU 板实现电源的控制、显示和相关参数的监测。PLC 控制系统通过电源提供的 RS422 全双工通讯接口实现数据交换, 完成磁铁电源的远程控制任务。

#### 3.2 模拟接口控制方案

在该装置中, 束流光学器件有四极电透镜、六极电透镜、导向器等。通过软件模拟计算, 电透镜和导向器沿束流线分布式放置。为了消除束流色散和提高束流品质, 透镜电源和导向电源要求高压正负对称输出, 对称性好于 0.1%, 电源稳定度好于 0.01%, 由于开关式高压模块内部高频变压器和高压电阻的非线性很难保证正负高压电源输出的对称性。采用硬件筛选和线路修正的方法可以改善输出的对称性, 但会增加制造成本。

为节约成本, 保证正负高压输出的对称性, 采用模拟接口的控制方式, 正负输出高压电源采用模拟量输出单独控制高压电源<sup>[3]</sup>。对每组正负高压电源测定 30 组高压设定和实际高压输出的对应数据, 通过测定的数据通过拟合软件进行公式拟合, 控制系统通过软件编程和公式计算实现正负高压电源高对称性输出。为提高控制系统实时性, 数据处理由上位计算机负责, 计算结果传送到现场 PLC 控制高压电源输出。如果需要更高的对称性, 可通过分段拟合的方式满足实际需求。

垫补线圈通过垫补稳流电源产生补偿磁场, 保证第一分析和主分析磁铁磁场的均匀性。垫补电源的稳定度

好于0.01%，纹波好于0.1%，使用模拟接口控制电源完全满足要求。

### 4 安全连锁设计

一套完备的电源控制系统，安全连锁对设备的保护和人员安全是必不可少的。对于300 kV后加速高压电源连锁如图2所示，连锁采用硬件和软件相结合的控制方式，电源间高压防护门、第一分析段屏蔽门和高压电源采用硬连锁，电源间屏蔽门、第一分析段屏蔽门和PLC电源控制系统采用软件连锁，双重连锁保证任何安全门打开，高压电源自动切断高压输出。高压电源安全连锁流程图如图3所示。磁铁电源连锁如图4所示，此智能磁铁电源和供电的磁铁构成完备的安全连锁，磁铁电源可以通过磁铁的流量开关和温度开关判断磁铁的工作状态，确保磁铁安全。控制室的工作站通过以太网与现场PLC通讯实现磁铁电源控制和监测磁铁电源的工作状态。

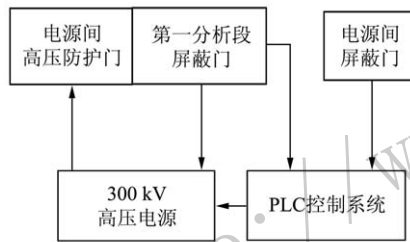


图2 高压电源连锁原理图

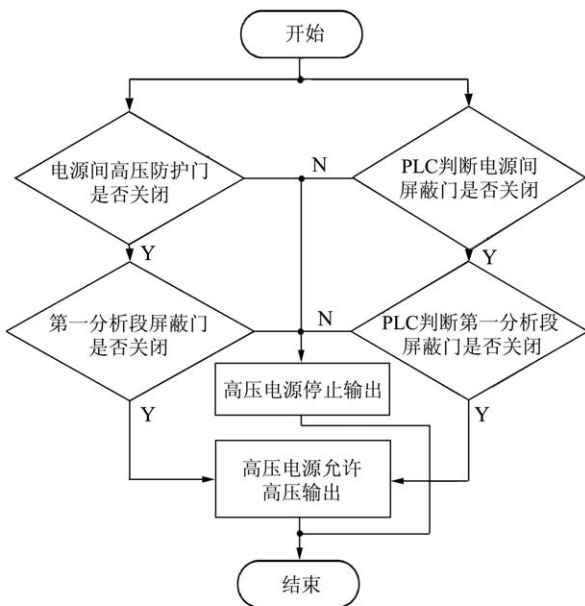


图3 高压电源连锁流程图

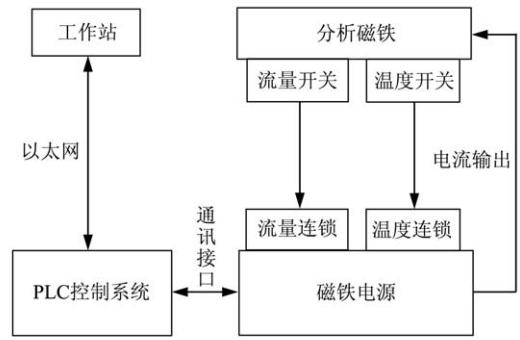


图4 磁铁电源连锁

### 5 控制系统抗干扰措施

BRISOL电源控制对象由于存在高压设备，在高压打火时，不可避免地在高压区域和周边产生强电磁干扰和地电位波动，很容易造成控制系统和受控设备的损坏。因此，必须采取措施减小和消除干扰的影响，保证设备稳定可靠。

对于BRISOL控制系统，高压平台内部的配电柜加入浪涌保护器作为一级保护，PLC控制机柜采用屏蔽机柜，供电输入加入二级浪涌保护器，进一步消除供电对控制系统的影响，屏蔽可以减少和消除强电磁干扰对控制系统的影响。控制机柜内部采用单点接地的方式，接地线尽量短而粗，为了降低集肤效应的影响，选用多股线作为接地导线。

PLC控制系统的开关量采用继电器与外部设备之间进行隔离，PLC模拟量模块采用电隔离方式，且在输入输出端加装匹配的瞬变抑制二极管限制瞬间高压的影响<sup>[4]</sup>。通过采取上述各种措施，确保控制系统和设备稳定可靠。

### 6 控制系统软件

系统的所有软件全部集成在SIMATIC程序管理器下，具有统一的软件平台。采用SIMATIC STEP 7开发下位机应用软件，使用SIMATIC WinCC V6.0组态软件实现上位机监控程序的开发。

在线同位素分离器装置按照不同的设备段编写电源控制界面。图5所示的靶源段控制界面，该段每台电源有单独的操作界面，很容易完成设备的监控；图6是转换段控制界面，对各种电源的控制，通过双击电源的图标弹出电源控制界面，可以对电源进行各种操作(如调节输出电压、设置输出电流等)，如果不需要显示可以关闭电源控制界面，程序后台运行<sup>[5]</sup>；对于通讯接口的电源设备，为提高控制系统对电源设备的响应时间，下位机控制程序采用定时中断的控制方式且设置优先级。

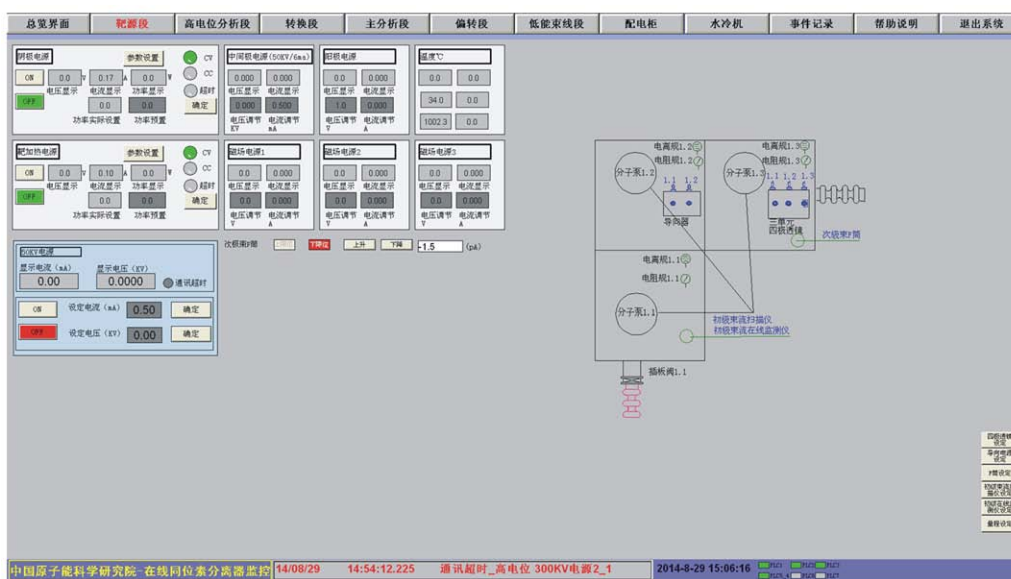


图 5 (在线彩图)靶源段电源控制界面

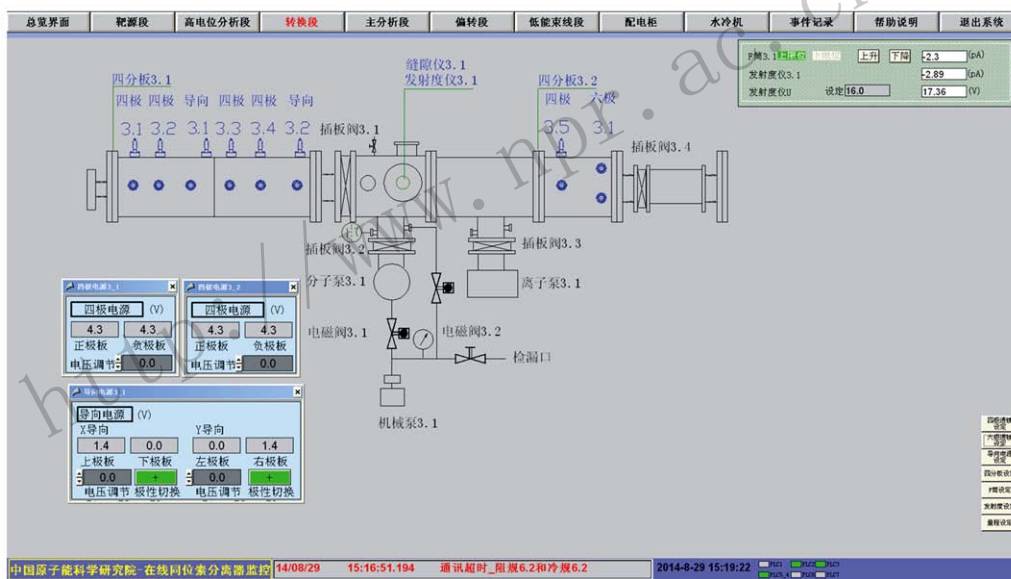


图 6 (在线彩图)靶转换段控制界面

采用模拟接口控制的透镜和导向电源，由于需要软件拟合保证正负电源输出的对称性好于 0.1% 甚至更高，为保证控制系统的响应时间，拟合计算使用上位计算机完成，结果通过以太网通讯由下位计算机控制模拟输出实现电源对称性。

为保存该装置在不同物理实验时电源的工作参数，设计了电源参数存储功能，数据存储格式是 EXCEL 表格，这样在以后实验时非常容易导入电源参数进行实验。为追溯电源的工作状态，设计了电源工作状态数据库，可以记录各种电源的工作时间、故障时间、故障代码等信息，便于电源的工作状态统计。

## 7 结论

在线同位素分离器装置高质量分辨率的技术指标对高压电源和磁铁电源的稳定性和输出纹波提出了苛刻的要求，必须选择合适的通讯接口集成到控制系统中。透镜和导向电源正负高压高对称性输出指标提出了一种全新的软件拟合校准方法，很好地保证了正负高压输出好于 0.1% 对称性的指标。

在高压打火发生时，高压区域产生的电磁干扰和地线波动影响设备的正常工作，通过采取电隔离、光隔离、电网输入端增加两级抑制电路以及单端接地等措

施, 消除干扰对控制系统和设备的影响, 确保系统工作稳定。

该装置的电源控制系统安装、调试已经完成。整套装置已经运行了1年多, 在实验过程中没有因为高压打火造成控制系统失效或设备损坏, 该装置的电源监控系统稳定可靠。

#### 参考文献:

- [1] GUO Honglei, GONG Peirong, LIU Ping, *et al.* Nuclear Techniques, 2008, **36**(1): 63 (in Chinese)  
(郭洪雷, 龚培荣, 刘平, 等. 核技术, 2008, **36**(1): 63)
- [2] ZHANG Demin, JIN Xiao, LI Ming, *et al.* High Power Laser and Particle Beams. 2008, **20**(4): 597. (in Chinese)  
(张德敏, 金晓, 黎明, 等. 强激光与粒子束, 2008, **20**(4): 597)
- [3] LI Jiangqi, WANG Xiaoli, WANG Chunhong, *et al.* 2011, **31**(10): 1086. (in Chinese)  
(李江琦, 王晓黎, 王春红, 等. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(10): 1086)
- [4] ZHANG Haiyan, PEI Yuanji, JIN Zhengfang, *et al.* Application of Electronic Technique. 1999, **25**(10): 21. (in Chinese)  
(张海燕, 裴元吉, 金正方, 等. 电子技术应用, 1999, **25**(10): 21)
- [5] ZHAO Huan, DING Jianguo. Nuclear Techniques, 2013, **36**(8): 080401. (in Chinese)  
(赵欢, 丁建国. 核技术, 2013, **36**(8): 080401)

## Development of Power Supply Control System For BRISOL Facility

MA Ruigang<sup>1)</sup>, CUI Baoqun, HUANG Qinghua, MA Yingjun, TANG Bin, CHEN Lihua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The Beijing Radioactive Isotope Separator On-Line(BRISOL) is a part of the HI-13 tandem upgrade project, mainly for the production of radioactive nuclear beam, identification of radioactive nuclide and injection into the HI-13 tandem. And the mass resolution of BRISOL is 20000. The distributed Ethernet architecture based on PLC was used for the power supply control system of BRISOL. This paper introduces the basic principle of the control system, the control schemes of various power supply, the measures to solve the interference and data storage, and also some consideration of design, including safety interlock, graphical control interface. Now, the control system has been put into use, and its performance is stable and reliable.

**Key words:** Beijing radioactive isotope separator on-line; control system; interface; safety interlock; anti-interference

Received date: 9 Sep. 2014; Revised date: 25 Aug. 2015

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11227804)

1) E-mail: rgma@ciae.ac.cn.