

文章编号: 1007-4627(2019)04-0426-07

一种测量重核素的小型高压型加速器控制系统的研制

周月, 李康宁[†], 游曲波, 胡跃明, 包轶文, 苏胜勇, 周建明

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 为满足中国原子能科学研究院最新研制的 400 kV 小型重核素加速器质谱 (AMS) 装置的自动控制的需求, 设计并实现了针对该装置的自动控制系统。从硬件和软件两个方面描述了系统结构。虚拟仪器 LabWindows/CVI9.0、PLC、数据库、组态软件等的相结合, 既组建了友好的人机交互界面, 又提高了系统的可靠性。自主设计的具有较高自动化水平的气体剥离器控制, 实现了同步监测、控制气体流量和真空度。自动换靶控制的零位指示和靶号显示相配合, 更精确地实现换靶功能, 提高了装置自动化程度。经长时间测试, 该测控系统满足了加速器质谱系统的自动控制及就地操作需求。

关键词: 高压加速器; 气体剥离器控制; 自动换靶控制; 自动控制系统

中图分类号: TL505; TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.04.426

1 引言

^{129}I 是一种长半衰期核素, 是放射性废物长期危害的主要来源之一。 ^{129}I 的测量对于核安全、环境科学、食品药品安全等具有重要意义。加速器质谱装置 (AMS) 具有测量样品量少且高效高灵敏的特点。此次由中国原子能科学研究院自主研制的 1 台 400 kV 小型化重核素 AMS 装置突破了重核素测量基于大型加速器测量的约束, 实现了小型化加速器对低能量重核素的测量, 成功完成了 ^{129}I , ^{239}Pu 等的高效高灵敏度测量。

随着计算机、网络、电子等技术的发展, 商业性的产品, 其标准化和技术的成熟, 一直推动控制系统的不断更新。目前, 国内外加速器控制系统大多采用“标准化”的分布式网络结构^[1-2]。鉴于以往对加速器控制系统的研制经验, 本工作将虚拟仪器、可编程控制器等用于小型结构的加速器质谱控制系统中, 完成了低能量重核素加速器质谱装置的自动控制系统的研制。此外, 为满足系统需求, 改变了国内外普遍采用的单泵或双泵结构的循环气体剥离器^[3], 依据本项目的结构特点, 设计实现了差分结构的气体剥离器的远程监控, 提高了系统的自动化水平。

2 系统总体结构

组件的分布式网络控制系统, 要求以系统的 3 个不同电位: 地电位、80 kV 离子源控制电位、400 kV 高压

台架控制电位组成的子系统为控制节点, 通过基于以太网的 TCP/IP 协议与控制室工作站主机进行通讯。子系统构成的分支网络根据现场仪器设备的通讯和测控要求, 采用包括: TCP/IP 协议、Modbus 协议、LXI 协议以及串口接口等多种混合协议和总线^[4]。同时, 为保证数据传输效率和高低电位之间的隔离, 各子系统之间采用光纤作为传输介质^[5]。结合实际工作要求, 需要实现就地控制操作方式。

3 系统硬件结构设计

本系统涉及的控制量较多, 主要包含: 地电位、离子源及高压台架的多个数字量和模拟量的输入输出、高电位中的流量控制、分子泵、机械泵及阀门控制等等, 因此系统需要较高的可靠性和实时响应速度。硬件的设计主要包含: 系统中涉及到的数字量和模拟量通过西门子 S7-300 PLC 的 I/O 端口实现。例如: 离子源的几组配套 Glassman 高压电源, 束线控制过程中预加速电源、Glassman 主高压电源等。串口设备通过 MOXA 串口设备联网服务器, 转为 TCP/IP 协议的网络控制。例如各子系统中真空计、高斯计、部分电源等。与监控部分的数据传输量和数据吞吐量相比, 测量数据的吞吐量比较大, 因此, 束线控制中的 AMETEK 直流电源部分通过 LXI 接口直接接入工业交换机, 再通过以太网控制。这样的设计既满足了数据的吞吐量又使系统具有良好的扩展性^[5]。系统结构及功能分布如图 1 所示。

收稿日期: 2019-02-25; 修改日期: 2019-03-25

基金项目: 国防科技资助项目

作者简介: 周月 (1990-), 女, 安徽淮南人, 硕士, 从事核技术及应用研究

[†] 通信作者: 李康宁, E-mail: likangning@ciae.ac.cn.

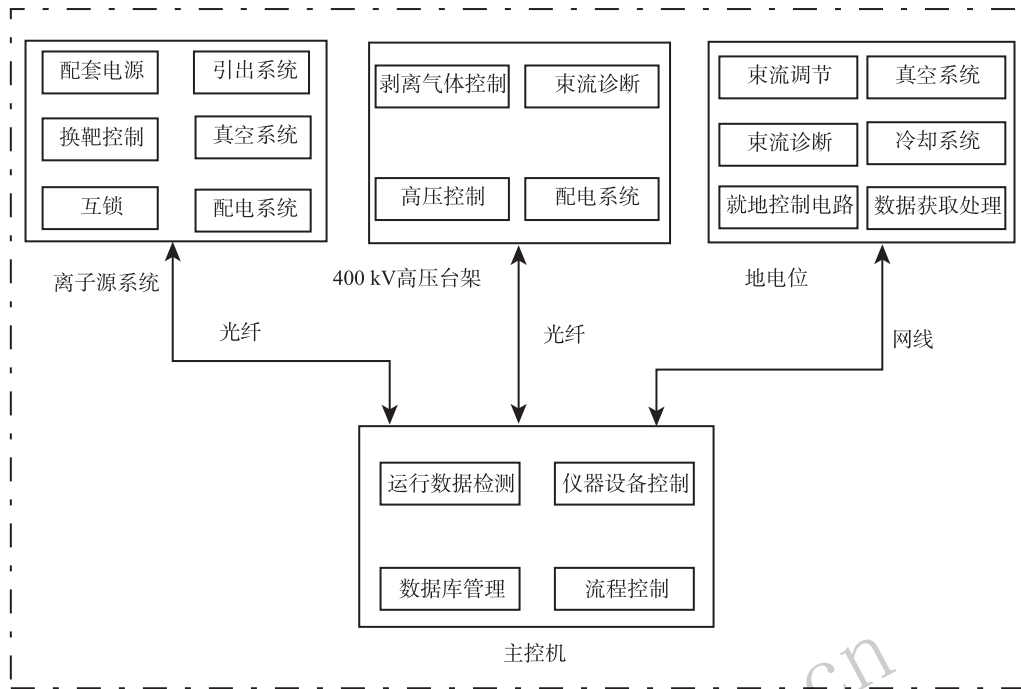


图 1 系统结构及功能分布图

3.1 气体剥离器系统

气体剥离器是将离子进行剥离，负离子转换为正离子，同时在穿越剥离气体时，分子离子瓦解成单原子离子，从而将分子离子排除，降低本底干扰。以往剥离系统设计使用的是单泵进行气体循环抽取，在抽取气体的过程中易造成加速管道真空度的下降，使系统真空不稳定^[3, 6]。吸取以前的经验，本项目采用差分泵的形式进行气体剥离，工作气体使用氦气。具体设计如图 2。由于系统工作一直处于高压环境，控制和测量信号使用光纤作为高压电极和地电位之间的传输介质，高电位上的

信号线使用具有屏蔽功能的线缆^[6]。控制过程设计：管道两端分子泵抽取气体，待管道真空稳定，剥离气体通过减压阀进入管道，管道内的真空度会随着剥离气体流量而变动，因此流量的控制和真空度的监测需同步进行。设计选用日本汇博隆 (流量参数：30 mL/min) 流量计与睿宝真空计进行监测，当真空度达到 6.0×10^{-3} Pa 时，剥离器的剥离效率达到最优。工作人员在就地操作和监测数值的同时，也可在工作站主机上进行气体流量调节和真空度监测。其中，流量计通过 PLC 数字量控制，流量设置和监测采用模拟量模块实现。

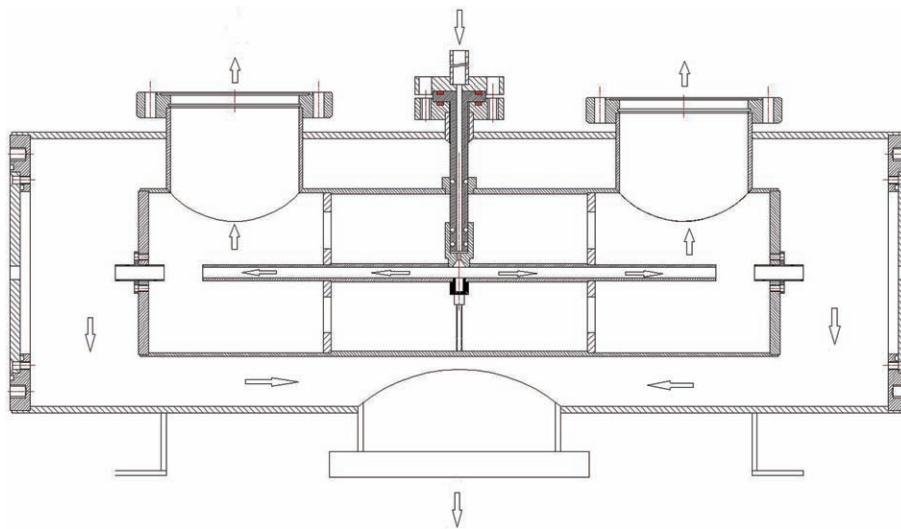


图 2 (在线彩图)气体剥离器机械设计图

3.2 自动换靶控制系统

靶盘及控制是离子源的重要组成部分。离子源采用的是多靶铯溅射负离子源，该离子源具有优良的性能。本项目的阴极盘可安装 39 个样品，由于处于高电位和地电位之间，为达到良好的电气隔离，阴极轮采用气动系统完成定位和转动的控制。整个换靶控制设计为就地和远程换靶两种操作方式。首先工作人员将操作权限设置为远程操作模式，并在界面上显示当前状态，待确认信息后，根据显示的当前靶号选择阴极盘的旋转方向(正转或者反转)，最后按下确认按钮，发出换靶信号，指示灯灭。直到本次换靶完成后，指示灯重新点亮。若未重新点亮，即使再次点击确认按钮，现场也不会进行响应。考虑到换靶的精确性，此次在远程换靶器上增加了零位指示功能和当前靶号显示功能，在换靶过程中，通过数字表头显示当前靶号，另当离子源阴极盘旋转到零靶号时表头上的零位指示灯会点亮且显示零位状态，控制界面如图 3。

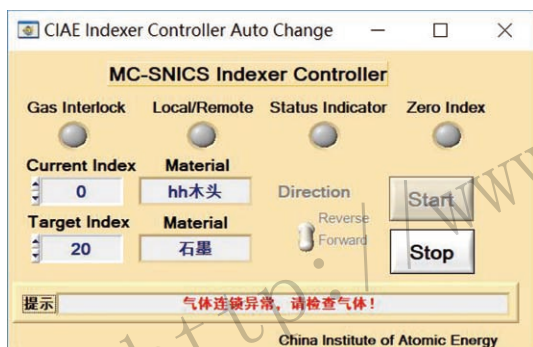


图 3 (在线彩图)靶控制界面

3.3 就地控制系统

在现场设置了离子源控制柜、台架控制柜和就地总

控制柜。除手动换靶操作外，还实现了子系统供电就地控制、真空部分的机械泵分子泵及阀门的操作、法拉第筒的控制及相关的连锁保护。为确保设备操作的准确性和人员的安全性，设置了相应的反馈信号。这样，在就地操作的同时，计算机旁的工作人员能实时监测设备当前状态。

4 系统的软件结构

控制系统的软件开发采用的是美国NI公司的虚拟仪器 LabWindows/CVI9.0^[7]，SQL Server 数据、串口联网服务器的配置程序、STEP7 组态软件等。利用这些软件的运算速度快，显示图形方便，用户界面友好等优点与 PLC 结合，提高了系统的可靠性和抗干扰能力。

4.1 上位机设计

上位机主要包括工作站主程序和数据管理两个方面。根据底层 PLC 的循环数据采集，整个测控系统的设备状态及数据显示在工作站主机上，工作人员通过操作界面，采用事件驱动的方式进行事件的即时响应及传输操控信息至底层 PLC 进行设备的相关操作。上位机的操作界面除了包含主控界面、电源控制、运行监控等外，还设计了单独的气体剥离器的控制界面和自动换靶操作的控制界面，如下图 4 所示。数据管理包括数据获取、处理、保存及查询，设备运行过程中重要数据的记录、存储及打印。考虑到服务器需要存储大量的数据，对数据库的可靠性能要求较高，综合考虑后选择使用 SQL Server 数据库。在设备运行过程中为方便数据流的传输，在数据库设计时将数据流表设为时间和数据两个字段，分别代表数据采集的时间和实时数据流的变量值^[8]。

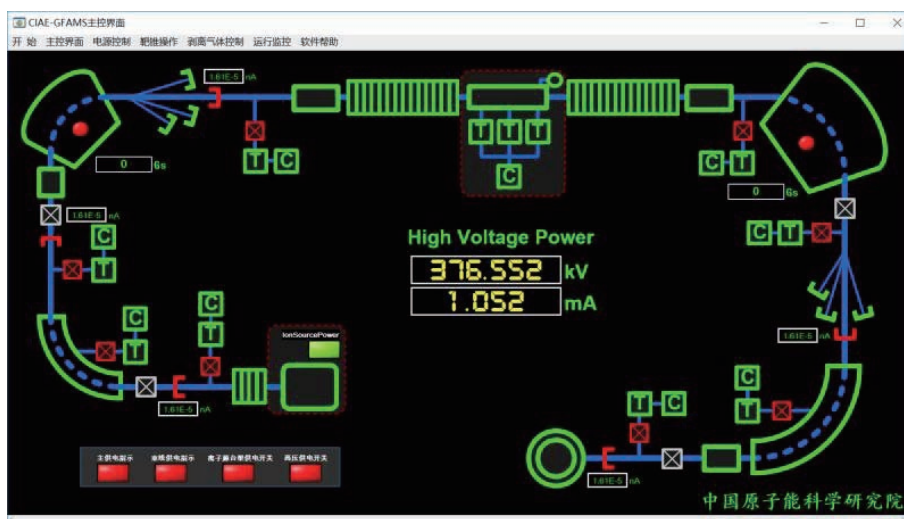


图 4 (在线彩图)主控界面

4.2 自动换靶控制的设计

除了实现在主机上监测就地换靶操作外，另设计了自动换靶控制系统。为保证在换靶过程中的稳定性及不影响其他的运行状态的显示，首先通过 PLC 获取当前的各个设备状态及当前靶号并显示在操作界面，通过回调函数，首先在判断满足连锁条件下选择操作模式，其中，手动可完成单次换靶，远程模式下可进行多次换

靶：通过判断靶号是否相同，若相同，则提示换靶成功信息，若不相同则根据当前靶号与目标靶号之间的绝对值大小与数值 20 作比较，进而选择换靶方向进行自动换靶。具体流程图如图 5 所示。

为实现工作人员的便捷操作，在远程换靶操作模式下建立了与数据库的连接，在换靶操作中，工作人员可通过操作界面查询到每个靶号所对应的样品材料及相关数据。操作界面如图 6 所示。

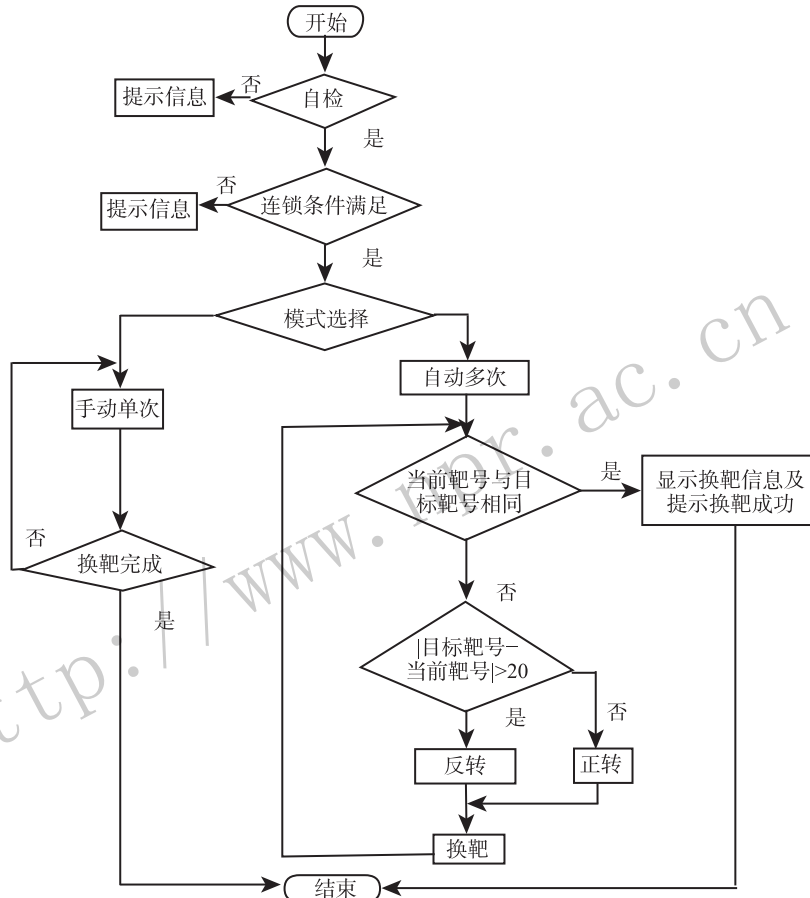


图 5 换靶控制流程图



图 6 (在线彩图)更换靶盘界面

4.3 气体剥离器的控制设计

根据以往有关对气体剥离器控制的设计经验和控制需求，将气体剥离器的控制设计到单独一个控制界面。控制过程设计：机械泵抽取管道真空，达到 1.0×10^0 Pa 时分子泵启动，待真空度为 1.5×10^{-4} Pa 时，工作气体

通过减压阀进入剥离管。工作人员可从远程控制界面进行流量的设置和监测、真空度的监测，从而判断剥离器系统是否投入使用。具体流程图如图 7 所示。整个控制界面可实现气体流量的监测和设置，剥离器真空的监测以及剥离器的关闭、控制和清洗。完整控制界面如图 8 所示。

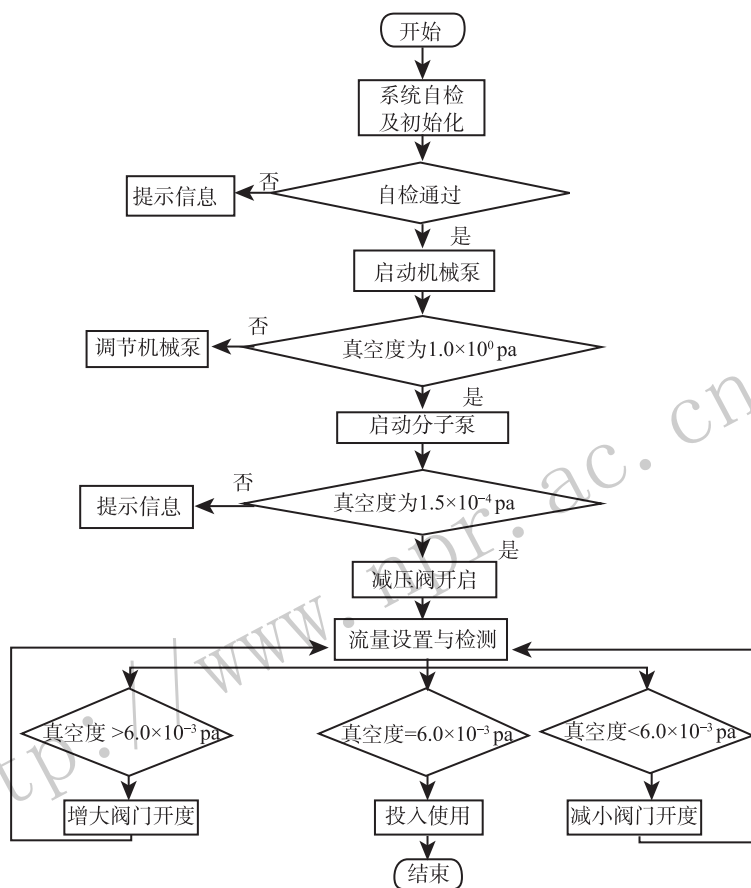


图 7 气体剥离器控制流程图



图 8 (在线彩图)气体剥离控制界面

4.4 下位机设计

下位机的程序采用 PLC 的编程软件 STEP7，实现数据的采集、运算、执行用户程序、监测运行状态等工

作。就地连锁和报警功能也设置在下位机中^[3]。

5 抗干扰及安全措施

加速器的工作环境处在高压和强磁场中，设备运行过程中易受到高压打火及信号干扰问题。在系统安全及抗干扰措施设计中，采用“软硬”结合的方法满足系统需求。

5.1 “硬”措施

为避免出现过压或欠压现象，对计算机控制系统的 220 V 电源设置单独供电。除就地设备外，离子源和高压台架从总控控制柜出来经隔离变压器后供电；强电类设备和弱电类设备接地单独处理^[9]，接地线均采用铜导线，各设备的接地点以单独的接电线引至接地极，屏

蔽线与保护线单独接入接地端子;为防止共模干扰影响PLC正常运行,在布线时,供电线缆、数字信号线和模拟信号线走不同的线槽通道,信号线与电源线保持足够的距离;在硬件选型时,选用带有隔离功能的硬件且控制线均选用带有双层屏蔽保护的线缆。

5.2 “软”措施

故障诊断:利用PLC本身的自诊断功能,当出现问题时,底层故障信号能即时响应,将报警信号递送至下位机和上位机程序中;互锁保护:瞬时干扰可能会影响I/O端口的状态,造成执行元件的误动作^[10],因此,采用常闭触点串联进行互锁保护^[11];数据保持:通过PLC控制的信号,利用PLC自身DB数据块的掉电保持功能,信号输入与输出都经过DB数据块,主程序运行时,通过DB数据块将信号赋值到输出信号。非PLC控制的信号量,通过上位机中数据库进行数据的保持和恢复。

6 总结与展望

系统在研制过程中吸取了以往经验的同时,结合项目的测量需求,实现了对不同电位的远程监控,自主设计实现的差分结构形式的气体剥离器控制和自动换靶控制,提高了效率和换靶精确度,为加速器质谱装置的小型化发展提供了较好的技术支持。目前,控制系统的设备已加工并安装完成,经过几次调试后,系统满足加速器质谱装置的控制需求,现已成功实现了¹²⁹I的高效高灵敏测量,其灵敏度达到 1×10^{-13} 。

加速器质谱小型化和低能量化是未来发展趋势,控制系统的技术也需不断更新以满足不同测量需求、运行环境等的要求,这也是未来具有挑战性的课题。

参考文献:

- [1] ROHRER L, SCHNITTER H. *AIP Conference Proceedings*, 1990, **473**: 252.
- [2] LU Xiangyang, LI Bin, GUO Zhiyu, *et al.* *AIP Conference Proceedings*, 1999, **475**: 903.
- [3] LU Xiangyang. *Atomic Energy Science and Technology*, 2000, **34**(4): 378. (in Chinese)
(鲁向阳. *原子能科学技术*, 2000, **34**(4): 378.)
- [4] LI Kangning, LI Xing, YOU Qubo, *et al.* *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2007, **27**(4): 259. (in Chinese)
(李康宁, 李兴, 游曲波, 等. *核科学与工程*, 2007, **27**(4): 259.)
- [5] LI Kangning, YOU Qubo, BAO Yiwen. *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, **52**(4): 762. (in Chinese)
(李康宁, 游曲波, 包铁文, 等. *原子能科学技术*, 2018, **52**(4): 762.)
- [6] LIU Kexin, ZHU Zheng, GONG Linghua, *et al.* *Nuclear Techniques*, 2007, **30**(12): 1003. (in Chinese)
(刘克新, 朱正, 巩玲华, 等. *核技术*, 2007, **30**(12): 1003.)
- [7] WANG Jianxin, SUI Meili. *LabWindows/CVI Virtual Instrument Testing Technology and Engineering Application*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 177. (in Chinese)
(王建新, 隋美丽. *LabWindows/CVI虚拟仪器测试技术及工程应用*[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 177.)
- [8] YANG Jun, SU Haijun, GUO Honglei, *et al.* *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(10): 100402. (in Chinese)
(杨君, 苏海军, 郭洪雷, 等. *核技术*, 2015, **38**(10): 100402.)
- [9] LI Kangning, LI Xing, MA Ruigang, *et al.* *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2007, **15**(2): 12. (in Chinese)
(李康宁, 李兴, 马瑞刚, 等. *北京石油化工学院学报*, 2007, **15**(2): 12.)
- [10] SUN Zhenwu, HUO Yuping, LI Xiaoyu, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2007, **41**(4): 396. (in Chinese)
(孙振武, 霍裕平, 李玉晓, 等. *原子能科学技术*, 2007, **41**(4): 396.)
- [11] SUN Zhenwu, LI Tao, LI Yuxiao, *et al.* *Electrical applications*, 2006, **25**(2): 43. (in Chinese)
(孙振武, 李涛, 李玉晓, 等. *电气应用*, 2006, **25**(2): 43.)

[1] ROHRER L, SCHNITTER H. *AIP Conference Proceedings*,

Development of a Control System for a Small High-pressure Accelerator for Measuring Heavy Nuclide

ZHOU Yue, LI Kangning[†], YOU Qubo, HU Yueming, BAO Yiwen, SU Shengyong, ZHOU Janming

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

Abstract: In order to meet the needs of the automatic control of the newly developed 400 kV small heavy nuclide accelerator mass spectrometer (AMS) facility of China Institute of Atomic Energy, an automatic control system for the facility was designed and implemented. The article describes the system structure from two aspects of hardware and software, virtual instrument LabWindows/CVI9.0, PLC, database, configuration software, *etc.*, to form a friendly human-computer interaction interface, and improve the reliability of the system. Self-designed gas stripper control with high automation level realizes synchronous monitoring, control of gas flow and vacuum. The combination of the zero indication and target number display of the automatic target change control achieves the target change function more accurately and improves the degree of facility automation. After a long time test, the measurement and control system realize the automatic control and local operation requirements of the accelerator mass spectrometry system.

Key words: high pressure accelerator; gas stripper control; automatic target control; automatic control system

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 25 Feb. 2019; **Revised date:** 25 Mar. 2019

Foundation item: National Defense Technology Funding Project

[†] **Corresponding author:** LI Kangning, E-mail: likangning@ciae.ac.cn.