

文章编号: 1007-4627(2019)04-0441-06

## 医用加速器装置的离子源进气系统控制

张建川<sup>1,2</sup>, 周德泰<sup>1</sup>, 李运杰<sup>1</sup>, 尹佳<sup>1</sup>, 王彦瑜<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

**摘要:** HIMM是国产自主研发的医用加速器装置, 作为目前最大的医学放疗装置, 整个加速器控制系统的稳定性和可靠性要比工业系统有更高的要求。离子源针阀是离子源产生束流的重要组件, 气体流量的大小和混合比直接影响源体真空度、电离效率、离子源稳定性等。本文针对HIMM离子源进气系统设计了基于三菱伺服电机和菲尼克斯PLC的控制系统, 从系统结构、硬件设计、软件设计、数据分析等方面进行了介绍。为保证系统稳定性, 加入伺服驱动器与相关真空度的硬连锁和远程开关功能。经过实际测试, 该系统运行稳定, 定位精度可达 $0.1^\circ$ , 满足设计要求。

**关键词:** 伺服电机; 控制; PLC

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.04.441

### 1 概述

重离子医疗装置 HIMM(Heavy Ion Medical Machine)是我国第一台具有自主知识产权的医用重离子加速器<sup>[1-2]</sup>, 它具有结构紧凑、可靠性高、成本低的特点。整个装置包括两个电子回旋共振 ECR(Electron Cyclotron Resonance)离子源、一个回旋注入器、一个紧凑型同步加速器和四个治疗终端<sup>[3]</sup>。离子源产生  $C^{5+}$  束流, 回旋注入器将  $C^{5+}$  束流预加速到 7 MeV/u, 并注入同步环加速器, 经过离子剥离技术和进一步加速后, 同步环加速器引出  $C^{6+}$  束流的能量范围可以达到 120~400 MeV/u<sup>[3]</sup>。

HIMM 采用蒸发冷却技术的常温 ECR 离子源, 在调束时, 将含 C 元素的气体( $C_2H_2$ ,  $CH_4$ 等)通过可调气阀送入弧腔, 在弧腔内通过微波作用后能够获得 C 元素的离子状态, 然后高压引出回旋需要的  $C^{5+}$  束流。气阀是离子源产生束流的重要组件, 气体流量的大小直接影响源体真空度、电离效率、离子源稳定性等<sup>[4]</sup>, 因此, 对气阀控制的精度、可靠性、稳定性等提出了较高的要求。同时, 作为一台医疗装置, 其控制系统的稳定性和可靠性又显得极其重要。

HIMM 离子源进气系统由气瓶、进气管路、气阀(针阀)、伺服电机等部件组成, 离子源进气系统有两路独立的气体, 一路工作气体, 一路支撑气体。从控

制系统角度分析, 直接被控设备为两台伺服电机, 这两台伺服电机和配套的伺服驱动器在离子源系统设计中已确定型号。根据被控对象的控制需求及控制系统人员工程经验, 出于系统可靠稳定性考虑, 设计了一套基于菲尼克斯可编程逻辑控制器 PLC(Programmable Logic Controller) 的进气控制系统。本文将从系统结构、硬件设计、软件设计、数据分析等方面对该系统进行介绍。

### 2 系统结构

HIMM离子源进气系统有两路独立的气体, 一路工作气体, 主要用于产生加速器需要的碳束, 一路支撑气体, 主要用于离子源烘烤和气体混合(gas-mixing)。离子源调束时, 支撑气体能够改进电荷态分布, 因此在某些情况下需要调节工作气体和支撑气体的混合比以达到理想的束流。离子源腔体是一个复杂的工作环境, 等离子体的产生是一个复杂的物理过程, 它与多种物理参数有关。离子源束流大小跟气体流量、微波功率、高压电源电压、真空度等多种条件都有很复杂的关系, 就本论文所述, 暂时只考虑束流大小和气体流量的关系, 简化公式如下:

$$I = p \left( \sum_{j=1}^2 Q_j \right) = p [f(\text{degreeA}) + f(\text{degreeB})],$$

收稿日期: 2019-05-15; 修改日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1632141)

作者简介: 张建川(1983-), 男, 河北高邑人, 高级工程师, 工学博士, 从事加速器控制与数据获取研究; E-mail: zhangjc@impcas.ac.cn

其中：工作气体为 A；支撑气体为 B；气体流量  $Q$  是针阀开角的函数  $f(\text{degree})$ ；束流大小  $I$  跟混合气体有一定的关系  $p(Q)$ 。两路气体直接由针阀控制其开度，针阀与电机通过联轴器固定连接，因此针阀的开度和电机转动角度相同。根据 ECR 离子源调节工作气体的需要，控制系统对电机的操作要达到如下指标：

调节范围  $0 \sim 20 \text{ r}$ ，即  $0 \sim 40 \pi \text{ rad}$ ；

调节精度  $1/3600 \text{ r}$ ，即  $0.1^\circ$ ；

转速约为  $3 \sim 4 \text{ r/min}$ ，即  $18^\circ/\text{s} \sim 24^\circ/\text{s}$ 。

根据以上设计需求，对硬件系统进行选型，软硬件设计，最终实现了基于三菱伺服和菲尼克斯 PLC 的进气控制系统。控制系统整体分三层，如图 1 所示，底层为被控对象，两台伺服驱动器。中间层为 PLC 控制器及其总线模块。PLC 控制器通过其脉冲产生模块(图 1 中的 PWM Module)输出脉冲串和方向信号给伺服驱动器(三菱 MR-J3-10A)，驱动器将脉冲信号转化为电机转动所需的三相交流信号，驱动电机按照指定的转速旋转一定角度。编码器实时回传位置信息给驱动器，并由驱动器通过 A/B/Z 信号回传给编码器监测模块(图 1 中的 Decode Module)。PLC 控制器通过自身所带的 DO(Digital Output) 端口，给两台伺服电机提供刹车信号，以实现急停功能。PLC 控制器通过 OPC(OLE for Process Control) 协议实现与界面服务器的数据交互。服务器程序将命令参数，如电机转动角度、方向、启动等通过 OPC 协议下发给 PLC 控制器，并通过 OPC 协议，回读 PLC 控制器中的编码器回读、电机运动状态等信息。上层服务器里面的界面程序

基于客户端/服务器 C/S(Client/Server) 架构，局域网内的任何一台计算机可通过 TCP/IP 协议，以客户端的形式操作用户界面。

### 3 硬件设计

#### 3.1 被控设备分析

HIMM 离子源进气系统被控对象为两个进气针阀，这两个针阀由伺服电机控制，操作针阀开关角度的电机型号为三菱 HF-KP13B AC SERVO MOTOR，该电机额定输出功率为 100 W，转速 3000 r/min，主轴上安装了 18 位增量编码器以获取电机旋转信息和 24 V DC 刹车信号以提供应急保护。与之匹配的伺服驱动器型号为 MR-J3-10A，其最大输入脉冲频率为 1 MHz，可通过脉冲串控制电机的转速和方向，进行精确定位。该伺服驱动器使用前需要将其 CN1 端子正确接线(见表 1)，用户自定义设置 PA05, PA13, PA15 等参数后才能正常使用<sup>[5]</sup>。该伺服驱动器 CN1 端子最少需要连接以下信号才能通过脉冲串控制。

表 1 三菱 J3 驱动器 CN1 接口需要连接的信号

CN1 pin NO.	Signal name	Connect to
10	PP	PWM module pulse-
11	PG	PWM module pulse+
35	NP	PWM module dir-
36	NG	PWM module dir+
4	LA	Decode module A
5	LAR	Decode module A/
6	LB	Decode module B
7	LBR	Decode module B/
8	LZ	Decode module Z
9	LZR	Decode module Z/
20	DICOM	24 V DC+
42	EMG	24 V DC-

伺服驱动器 MR-J3-10A 控制端口 CN1 提供了多种信号电平和信号形式的选择，可供不同类型的控制器连接。在本系统设计中，采用了差分信号连接、脉冲+方向的控制模式。

#### 3.2 PLC 模块介绍

控制系统的 PLC 控制器选用德国 PHOENIX 公司的 ILC 171 系列紧凑型控制器，该控制器可以支持 Modbus/TCP 和 PROFINET 等基于以太网的传输协议、程序内存和数据存储器均为 512 kByte<sup>[6]</sup>，其运行的程序默认轮询周期为 4 ms，可以满足时间要求。控制器通过 INTERBUS 总线连接脉冲发生模块 IB IL PWM/2-PAC 和编码器回读模块 IB IL INC-IN-PAC，

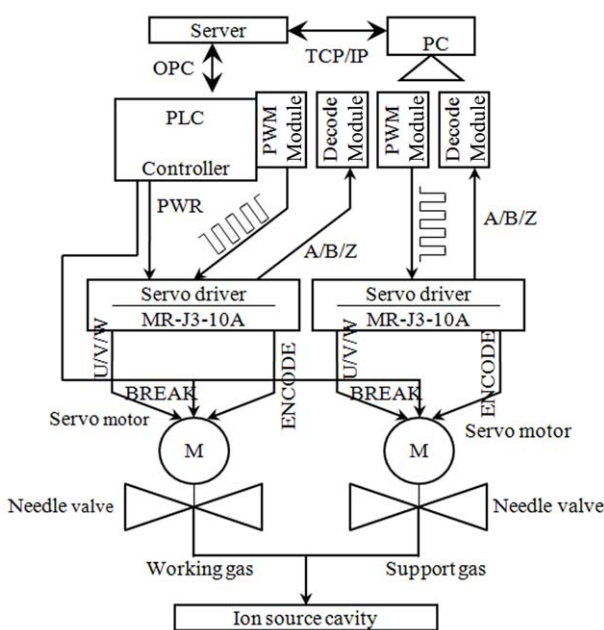


图 1 HIMM 离子源进气控制系统结构

其中 IB IL PWM/2-PAC 模块有 2 个独立通道, 可输出 5 V 或 24 V 信号, 最大频率 50 kHz, 本设计中使用其单独脉冲输出模式, 脉冲长度可在 10 μs 到 25.5 s 间设定, 频率可在 0 和 50 kHz 间设定<sup>[7]</sup>。图 2 是该模块的脉冲加方向模式输出的波形图, 符合伺服驱动器的输入

信号需求。IB IL INC-IN-PAC 模块可将带矩形信号的对称 (RS-422) 和不对称 (5 V DC 到 24 V DC) 解码器连接到接线端子。无论有无 Z 脉冲, 都可读取旋转变送器或长度测量系统。最大输入频率 300 kHz, 25 位实际位值, 通过 1x、2x 或 4x 采样进行精确评估<sup>[8]</sup>。

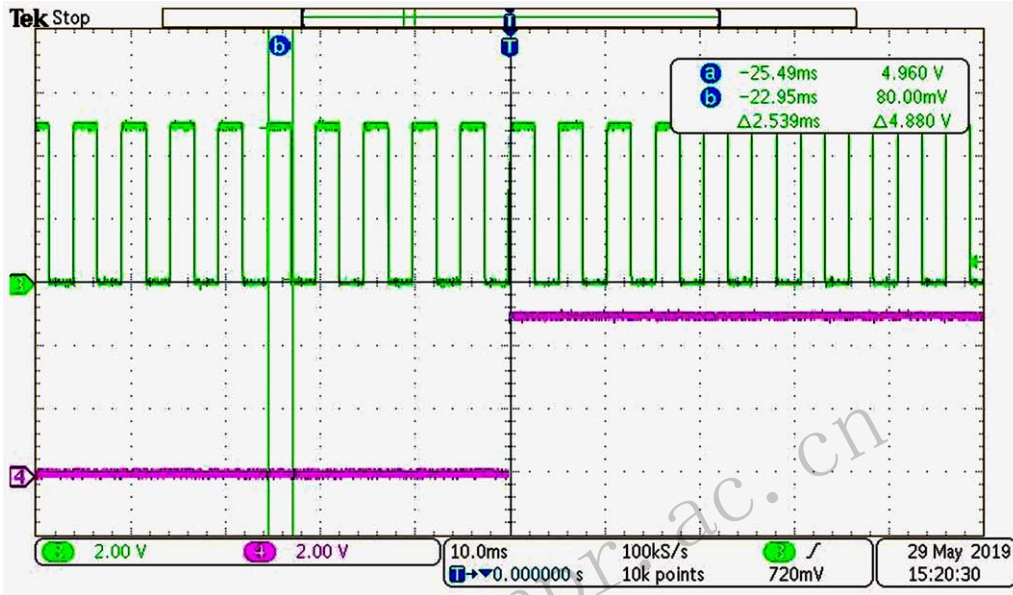


图 2 (在线彩图) 脉冲发生模块输出的脉冲+方向波形示意图

### 3.3 PLC 程序设计

系统使用的 PLC 控制器编程符合 IEC 61131-3 标准, 支持梯型图、ST 语言、功能框图等 5 种编程语言。该控制器的不同功能模块均提供一定的过程控制字, 用户程序通过这些过程控制字的操作实现指定的功能。针对本系统使用的脉冲发生模块 IB IL PWM/2-PAC, 采

用 ST 语言编写了可操作该模块的功能块程序, 功能块对外提供脉冲频率设定、方向设定、脉冲数给定、启动、急停等输入参数和模块 ready、输出脉冲数实时回读等输出参数。

脉冲发生模块 IB IL PWM/2-PAC 的过程控制字有两个, 分别为输出的 32 bit 双字和输入的 32 bit 双字。这两个过程控制字的详细定义如图 3 所示。

Process Data Output Word 0											Process Data Output Word 1											(a)										
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
Mode		DIR RST		Frequency (11 bits)											Target position (16 bits)																	
Process Data Input Word 0											Process Data Input Word 1											(b)										
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
Mode		DIR	Ready	RES.												Positioning counter (25 bits)																

图 3 脉冲发生模块 IB IL PWM/2-PAC 输出(a)输入(b)控制字详细释义

根据对这些控制字的详细分析, 设计如图 4 所示的 PLC 程序流程。首先根据模块不同的工作状态, 定义空闲、工作和完成三个状态, 三个状态间的转换条件为接收到启动命令、脉冲串发送完成和数据复位后等待 5 ms。在空闲状态完成的操作有对输入数据的判选、处理、暂存以及对输入控制字中状态信息的回读、解析和显示。工作状态完成的操作有对输入参数的格式转

化、拼接、写入和实时显示发送脉冲的累计值。当发送脉冲的累计值等于设定值, 程序进入完成状态。完成状态的操作有对所有相关参数的复位及数据保存, 等待 5 ms 后自动进入空闲状态, 等待下一次操作命令。

该功能块程序使用 ST 语言实现, ST 语言编写的程序在代码量、可读性和后期调试难度方面都很有优势, 尤其对较为复杂的数字转换、逻辑处理、状态机等功能,



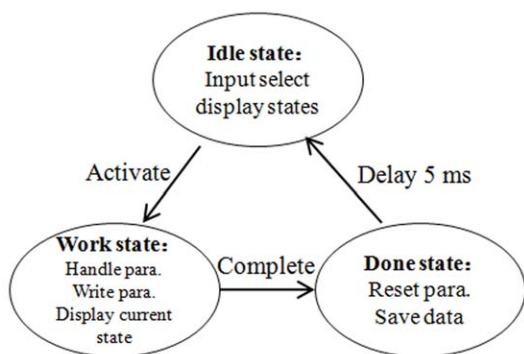


图 4 PLC程序状态转化流程图

可减少程序员的工作量，增加程序可读性。

与上面描述的方法类似，通过对模块过程控制字的分析和编程，同样实现了编码器回读模块IB IL INC-IN-PAC的功能块程序，功能块对外提供编码器类型选择、偏移量设定、启动等输入参数和输出数值 ready、输出编码器回读值等输出参数。同时，由于其 25 bit 数据长度引起的负值在 32 bit 双字结构中“误读”的问题，专门加入了负值校正功能，以保证数据的准确性。

ST 语言实现的脉冲发生模块功能块和编码器回读模块的功能块在主函数中通过实体调用，调用实体输入输出均采用全局变量，且需要与上层程序交互的变量以 OPC 变量的形式发布，通过 OPC Server 和 OPC Client 配置，上层用户界面可随时读写这些底层数据。除此之外，因为选用的电机编码器为增量编码器，非绝对值编码器，程序中需要将电机绝对位置等变量存入 ROM 区，实现断电保持。

### 3.4 硬件联锁功能

在系统调试阶段，由于现场干扰造成驱动器失控乱转，出现进气量越来越大，进而破坏离子源真空的故障。根据设备特点及现场条件，设计了驱动器供电与真空度的联锁保护功能，通过真空计提供的触点信号和中间继电器来完成对电机的强制刹车。并在此基础上增加驱动器的远程开关功能，进一步降低此类风险。图 5 为驱动器远程开关与真空连锁示意图，离子源正常运行时，不需要进气调节，驱动器处于断电状态。当需要调节进气时，前端服务器通过命令使相应 PLC 输出 24 V DC 信号，中间继电器动作，伺服驱动器上电。如果在进气调节过程中，由于进气过多造成真空条件变差超过阈值时，真空计触点信号断开，驱动器自动断电，这样可以避免真空度进一步变差造成的故障，达到真空与进气的连锁。虽然正确使用伺服驱动提供的 EMG 信号也能达到硬连锁功能，但是现场干扰较大的环境中，不能保证电子器件故障造成的失控乱转情况，而直接切断电

源的硬连锁能够彻底杜绝非正常状态下电机的失控，保证腔体内真空环境不受破坏。

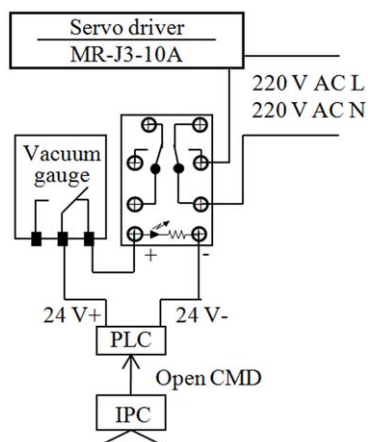


图 5 驱动器远程开关与真空连锁示意图

## 4 软件设计

### 4.1 用户界面程序

用户界面采用 C++、Flash 和组态软件相结合的方式开发而成，其中 C++ 用于开发底层与设备交互的驱动程序，组态软件用于开发数据的交互与处理，以及大部分的控制界面，Flash 开动态画面。软件架构采用的是 B/S 的方式，核心的控制软件运行在服务器上，在中央控制室的计算机上可通过浏览器加载控制页面。用户程序可提供历史数据查询功能，目前系统支持以一秒的时间间隔连续保存一个月的历史数据，方便离线分析离子源进气量的改变与束流品质的关系。

底层 PLC 控制器集成 OPC Server，在 PLC 编程时，将需要与上层界面交互的变量以 OPC 变量发布。界面服务器与 PLC 控制器在同一局域网内，服务器中配置 OPC Client 端，连接 PLC 发布的 OPC 变量。实现界面程序的组态软件自带数据库，将用户定义的程序变量与 OPC Client 连接的变量关联，即可通过程序变量直接操作 PLC 发布的变量，进而控制进气电机的运动。

离子源进气控制程序流程如图 6 所示。文中 3.4 节硬件联锁功能设计中提及，为提高系统安全性，离子源正常供束，不需要调节进气时，驱动器处于断电状态。因此，当需要操作进气控制界面时，首先查询伺服驱动器的状态，如果处于断电状态（未上电或真空连锁），则首先给驱动器上电。用户程序运行过程中，电机实际位置与设点位置实时比较，若不一致且执行按键动作后，首先计算出位移量、方向，再结合频率给定，下发给 PLC 控制器执行这次调节。电机运动过程中，界面

以 1 Hz 的频率刷新电机实际运动量回读。本次调节完成后, 界面重置当前位置显示和给定设置, 等待下一次调节命令。最终实现的离子源进气控制界面如图 7 所示, 实现了两路气体的位置回读、位置给定、方向设定、启动命令等基本操作和数据查询功能。

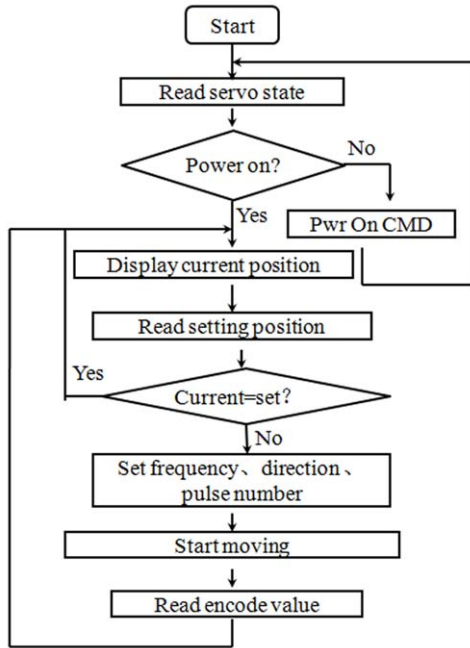


图 6 离子源进气控制程序流程图

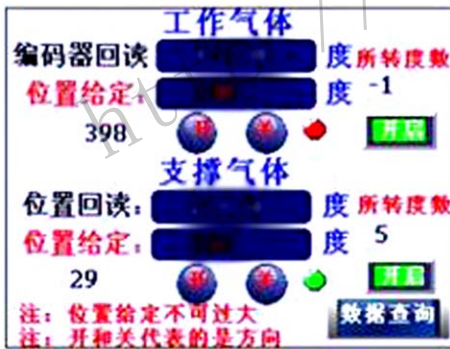


图 7 (在线彩图) 离子源进气控制用户界面

#### 4.2 数据校正

进气调节程序的原始数据来自底层 PLC 提供的 OPC 变量, 例如电机移动的脉冲数量、编码器回读的脉冲数等, 这些变量需要通过一定的公式转化为用户熟悉的物理参数, 比如转动角度。OPC 变量和物理参数的对应关系需要通过现场测试获得原始数据、数据分析和多次校正才能达到最终的控制要求。

图 8 显示的是进气调节设定值和编码器回读值校正前后的对比图。其中图 8(a) 中黑色方格代表进气设定值(单位是角度), 红色三角代表编码器回读值(单位

是脉冲个数), 从图中可以看出编码器回读值与角度设定值存在一定的线性关系(反比), 需要进行公式转换后才能给出用户需要的物理量, 并计算电机控制的精度。图 8(b) 是将编码器回读值转换为角度值以后的曲线, 校正后两条曲线几乎重合, 为方便观察, 将两侧 Y 轴坐标设置 offset 为 1 的偏移量。为提高控制精度, 通过 MATLAB 数据拟合得出编码器回读值转换为角度值的公式, 并将该公式加到界面参数和 PLC 参数转换过程中。

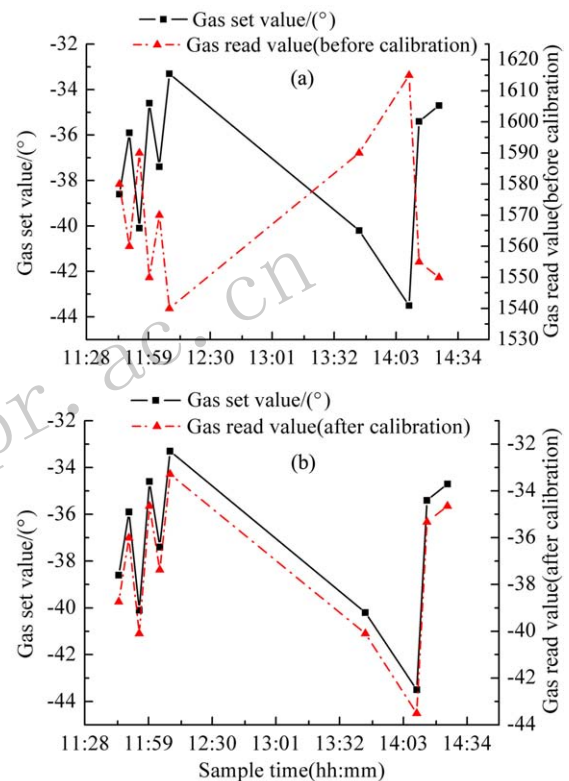


图 8 (在线彩图) 进气设定值与回读值对比 (a)校正前; (b)校正后。

除了编码器回读数据需要校正以外, 位置给定参数也需要通过公式转换为脉冲数, 获得校正公式的方法与编码器回读值类似。

给定值和回读值都通过校正后, 计算两者的差异, 得出采样点数据给定值和回读值的偏差最大为 $-0.13^\circ$ , 最小为 $0.002^\circ$ , 标准差为 $0.07^\circ$ , 达到了 $0.1^\circ$ 偏差的设计要求。

#### 5 总结和展望

经过长时间测试和运行, 基于 PLC 和伺服系统的离子源进气控制稳定可靠, 支持了整个治疗装置的调试运行, 可实现 $0.1^\circ$ 的定位精度。基于 B/S 架构的操作界面充分考虑用户需求、用户操作习惯, 保持简洁和高效,

用户体验良好。此外,针对干扰强的复杂现场或者控制器距离有要求的场合, J3 控制器也提供了 CN3 命令接口,通过发送相应指令,并配合 CN1 接口实现直接对驱动器的控制进而实现电机定位。

另外,通过对真空、高压电源电流值等与进气相关的物理参数的数据进行分析发现,进气量和真空度、高压电源电流有一定的规律趋势,但是由于采样数据的限制,它们之前的物理关系暂时无法总结为一定的公式,下一步可以优化程序,增加采样率,以便累计大量有用数据,进而对数据进行相关性分析,总结气体条件与真空条件、高压电流等相关物理参数的规律,对物理人员提供一定的参考帮助,提高调束效率。

#### 参考文献:

- [1] SONG Mingtao, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* Nuclear Physics Review, 2001, **18**(2): 116. (in Chinese)  
(宋明涛, 詹文龙, 魏宝文, 等. 原子核物理评论, 2001, **18**(2): 116.)
- [2] XIAO Guoqing, ZHANG Hong, LI Qiang, *et al.* Nuclear Physics Review, 2007, **24**(2): 85. (in Chinese)  
(肖国青, 张红, 李强, 等. 原子核物理评论, 2007, **24**(2): 85.)
- [3] YANG J C, SHI J, CHAI W P, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2014, **756**: 19.
- [4] CHANG Jianjun, LIU Xiaojun, GU Kewei, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2015, **49**(Suppl.): 601. (in Chinese)  
(常建军, 刘小军, 顾可伟, 等. 原子能科学技术, 2015, **49**(增刊): 601.)
- [5] Technical Datasheet of Mitsubishi AC Servo MELSERVO-J3. Mitsubishi Electric Automation (Shanghai) Co., Ltd. (in Chinese)  
(三菱电机通用交流伺服 MR-J3-A 伺服放大器技术资料集, 三菱电机自动化(上海)有限公司.)
- [6] User Manual of ILC 171 ETH 2TX Inline Controller [EB/OL]. Phoenix Contact. (in Chinese)  
(控制器 ILC 171 ETH 2TX 技术数据 [EB/OL]. 德国菲尼克斯公司.)  
<https://www.phoenixcontact.com/online/portal/cn>
- [7] IB IL PWM/2(-PAC) Data Sheet, PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG, Blomberg, Germany. 2007.03.
- [8] IB IL INC-IN(-PAC) Data Sheet, PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG, Blomberg, Germany. 2009.07.

## Design of Ion Source Gas Control Used in Heavy Ion Medical Machine

ZHANG Jianchuan<sup>1,2,1)</sup>, ZHOU Detai<sup>1</sup>, LI Yunjie<sup>1</sup>, YIN Jia<sup>1</sup>, WANG Yanyu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** HIMM (Heavy Ion Medical Machine) is a self-designed and independently developed medical accelerator device in China, the stability and reliability of the whole accelerator control system is higher than that of the industrial system. Ion source gas valve is an important component of ion source to generate beam. The gas flow rate and mixing ratio directly affects the vacuum, ionization efficiency and stability of ion source. This paper introduces the gas control system based on Mitsubishi servo motor and Phoenix PLC for HIMM ion source system. The system structure, hardware composition, PLC program, interface program and data analysis are presented. In order to ensure the stability of the system, hard interlocking with vacuum values and remote switching functions are added to the motion control. The actual test shows that the system runs stably and the positioning accuracy can reach  $0.1^\circ$ , which meets the design requirements.

**Key words:** servo motor; control; PLC

Received date: 15 May 2019; Revised date: 19 Jul. 2019

Foundation item: Joint fund of National Natural Science Foundation of China (U1632141)

1) E-mail: zhangjc@impcas.ac.cn.