

文章编号: 1007-4627(2019)04-0433-08

## 重离子治癌加速器束流探测器运动控制系统设计

李维龙<sup>1,2</sup>, 李生鹏<sup>3</sup>, 李敏<sup>2</sup>

(1.中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 兰州科近泰基新技术有限责任公司, 兰州 730000)

**摘要:** 重离子医疗装置(HIMM)中需要束流诊断探测器来测量加速器束流参数, 其中大部分探测器属于拦截式探测器, 拦截式探测器在测量束流参数时需要将探测器探头插入束流管道中心, 测试完成后将探测器拉出。另外, 部分探测器需要联动控制, 针对上述需求, 设计了基于EtherCAT协议的拦截式探测器的运动控制系统架构, 并且开发了基于OPC UA(OLE for Process Control Unified Architecture) 协议的客户端/服务器软件系统, 所有拦截式探测器已通过CFDA(China Food and Drug Administration)验证, 自2017年起在束运行至今。使用结果表明, 该系统具有较高的稳定性以及可移植性, 控制精度以及控制模式均可完全满足现场应用要求。

**关键词:** 重离子治癌装置; EtherCAT协议; OPC UA协议; LabVIEW; TwinCAT

**中图分类号:** TL56      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.04.433

### 1 引言

重离子医疗装置(Heavy Ion Medical Machine)是由中国科学院近代物理研究所及科近泰基研制生产的用于癌症治疗的加速器专用装置<sup>[1-2]</sup>。装置总体布局如图1所示。

该装置通过束流诊断系统测量束流参数来监视束流

传输和加速器的必要参数。装置中束流诊断系统涉及中能束运线、同步环、高能束运线、终端4个子系统组成。束流在四个子系统中安装有多丝、单丝、分条电离室、狭缝、法拉第筒等18种106个探测器用于测量束流参数,其中需要实现运动控制的探测器共86台<sup>[1]</sup>。主要探测器统计见表1所列。



图 1 (在线彩图)重离子医疗装置项目布局图

收稿日期: 2019-06-03; 修改日期: 2019-07-05

作者简介: 李维龙(1988-), 男, 甘肃兰州人, 工程师, 硕士, 从事控制理论相关研究; E-mail: lw11228@impcas.ac.cn。

表 1 项目中束诊主要拦截式探测器数量统计

探测器	数量	探测器	数量	探测器	数量
法拉第筒	4	多丝	6	荧光靶	12
分条	13	狭缝	10	束晕	12

目前国内外加速器探测器运动控制系统, 所用电机主要有伺服电机与步进电机, 比如 ANKA 同步辐射光源采用 VME-bus 协议的步进电机<sup>[3]</sup>, 德国电子同步加速器 (DESY) 的 Electron Linacs and FELs 所用的快速单丝就采用了精度更高的伺服电机<sup>[4]</sup>。控制协议也有多种类型可选择, 比如 CANopen、EtherCAT 协议等, 具体可根据设计需求选用, 如果控制探测器较多, 并且布线要简单、灵活, 那么 EtherCAT 协议是最佳选择, 如果对运动控制精度要求较高, 可选择伺服电机, 因此, 本文所设计的束诊运动控制系统架构选择了基于 EtherCAT 协议的伺服控制系统, 本文将详细介绍该系统的设计过程, 并描述其在束应用结果。

## 2 束诊探测器运动控制系统设计指标

束流诊断系统的拦截式探测器数量、种类较多, 不同类型的探测器其运动控制要求不同, 因此在设计运动控制系统架构时需从通用运动控制设计要求和个别探测器的特殊运动控制要求两方面考虑<sup>[5]</sup>。束流诊断运动控制系统设计指标如下所示:

- (1) 故障率小于 1%;
- (2) 使用周期至少 3 年;
- (3) 采用光电、机械双限位保障机制;
- (4) 电机具有断电抱闸功能 (机械抱闸);
- (5) 电机和控制器之间线缆长度可达到 10 m;
- (6) 电机精度小于 5  $\mu\text{m}$ , 准直精度好于 0.1 mm (按行程 100 mm 计算);
- (7) 可以支持多个客户端根据优先级来远程连接服务器来实现探测器控制任务;
- (8) 控制系统能够循环检查探测器前后限位、当前编码器位置、绝对位置等参数并在出现故障的时候及时报错;
- (9) 冗余设计, 当其中一个探测器出现运动故障不能够影响其它探测器正常工作。针对上述运动控制系统的设计需求, 前 7 项从硬件性能角度提出了需求, 第 8、9 项则是从运动控制的软件实现角度提出了需求。电机的同步控制要求实现电机独立控制以及多个电机协调同步控制; 远程运动控制需求则是必然要满足的条件, 由于探测器安装在加速器现场, 加速器在运行与调试过程中辐射极强, 考虑到人身安全, 所有探测器必须能够实

现远程控制。

在该设计中要求控制系统可以实时监测探测器限位、位置、速度等状态。设计指标第 9 项要求设计中还需考虑到冗余, 则要求运动控制系统选择合适的控制模式, 选择合适的通信协议, 不会因控制系统中的局部问题导致整个运动控制系统的瘫痪, 以确保系统的稳定性和安全性。综合上述原因, 项目中选择基于 EtherCAT 协议的驱动器。

## 3 运动控制系统总体架构设计

由于项目中选用的 EtherCAT 协议支持多种网络拓扑结构, 比如线性、星型、菊花链连接, 所以非常方便探测器扩展。同时, 由于每个 EtherCAT 主站可以连接多达 65 535 个子站<sup>[5]</sup> (设备), 这样在设计运动控制系统的时候就不需要过于关注前端探测器数量过多所引起的各种网络配置因素。

由于 EtherCAT 基于传统以太网, 因此可以使用标准以太网电缆或光缆进行连接, 使用 100Base-TX 电缆时, 每个站之间距离可达 100 m, 而考虑我们的加速器现场探测器安装位置, 在使用同一个主控制器的环网内相邻探测器的直线距离不会超过 100 m, 所以以太网 100BASE-TX 完全满足现场探测器的网络连接需求<sup>[5]</sup>。

同时, EtherCAT 可实现网段之间的热连接与热断开。EtherCAT 网络中有一个电机驱动器出现故障, 该故障不会影响其他 EtherCAT 设备的正常工作, 很好地达到了设计指标中关于冗余设计的要求。

根据项目技术要求, 以及束诊探测器的工作模式, 束诊探测器的运动控制系统总体分为三层, 见图 2。

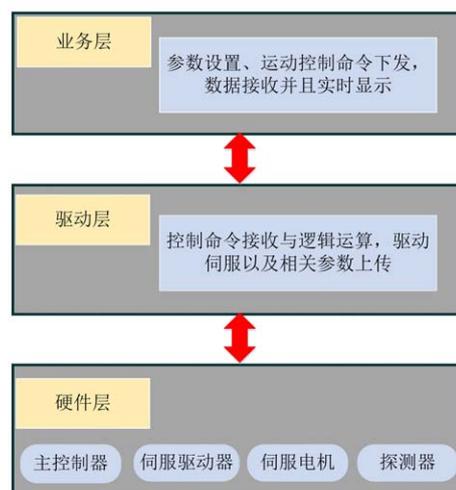


图 2 (在线彩图) 束流诊断探测器运动控制系统架构

第一层为业务层。该层可支持多个客户端同时连接同一个服务器进行并行通信，且各个客户端之间相互独立。该层主要为项目加速器操作人员提供可视化界面，方便操作人员实现探测器远程控制，也为远程参数配置，控制命令发送提供接口。同时也对探测器当前位置、限位状态、以及电机当前运动状态、错误报警等信息进行实时监测。

第二层为驱动层。该层主要接收客户端下发的控制命令，对控制命令进行解析以后进行逻辑处理，然后通过伺服控制器控制伺服电机，实现探测器的运动控制。

第三层为前端探测器硬件层。该层主要有主控制器、伺服驱动器、伺服电机以及各种类型的探测器组成，主要完成探测器实际运动任务。

#### 4 控制系统硬件架构设计

为了满足系统设计指标，项目中选用伺服电机以

及支持 EtherCAT 总线协议的伺服驱动器。在实际应用中，综合考虑后伺服驱动器选用科尔摩根 AKD 系列驱动器，伺服电机也选用美国科尔摩根 AKM 系列电机。主控制器选用德国 Beckhoff<sup>[6]</sup>工业控制器 CX2040 作为主控制器，通过菊花链的 EtherCAT 网络拓扑结构将分布的伺服驱动器连接起来，能够实现每个探测器的独立运动，还可以精确实现多个探测器的同步运动。由于项目中拦截式探测器较多，为了控制方便，根据探测器位置分布以及其特殊性能，所有探测器被划分为 4 个独立的基于 EtherCAT 的运动控制环形网络(以下简称环网)，每个环形网络由 10~20 个探测器与一个主控制器组成。图 3 显示了该系统基于 EtherCAT 总线拓展的多电机控制硬件拓扑结构。由拓扑图可以看出，每一个环网的驱动器都通过网线采用菊花链的方式来串联，并且将最后一个驱动器的输出也接入控制器 EtherCAT 口，形成一个闭环，实现整个系统的冗余功能。

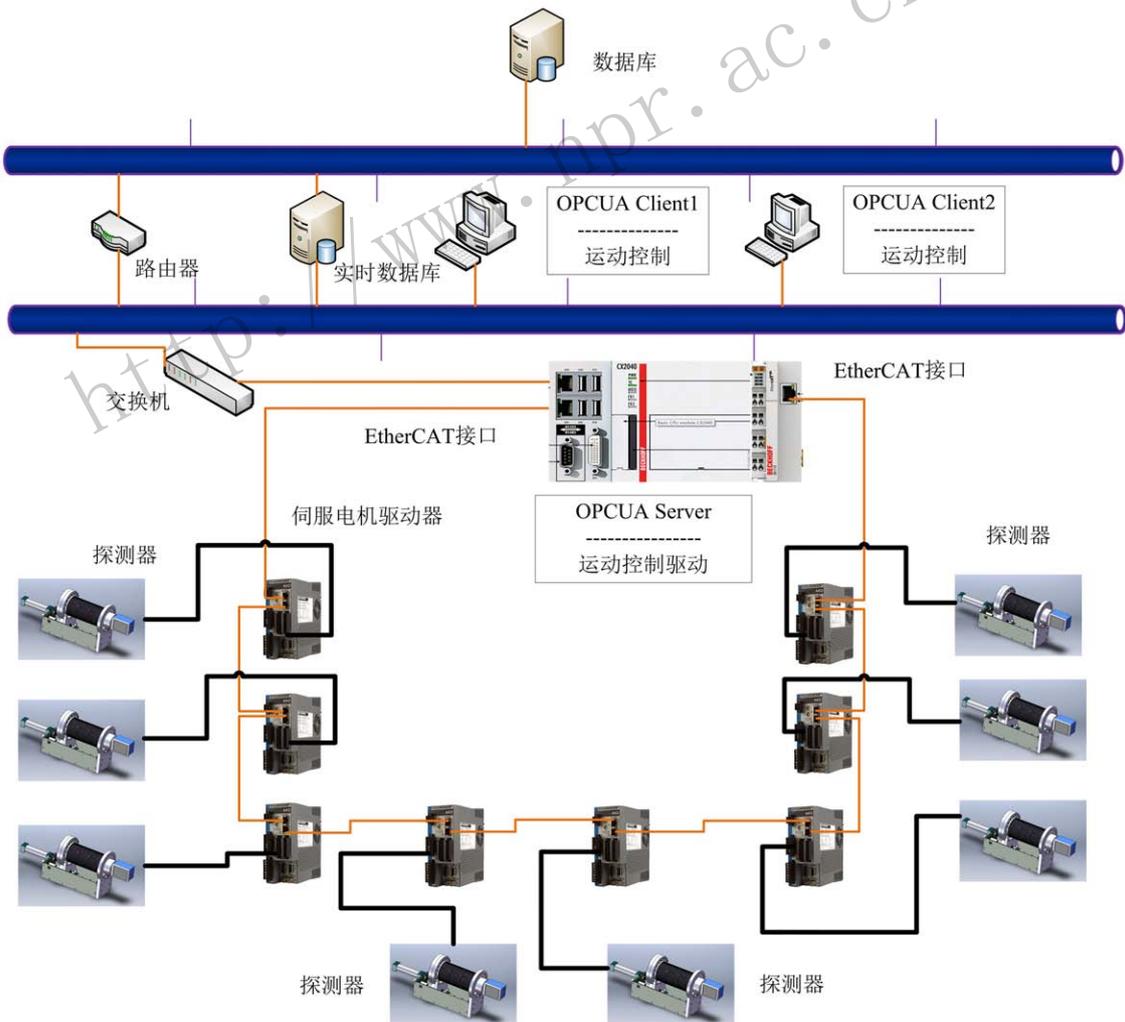


图 3 (在线彩图) 探测器运动控制系统硬件拓扑结构

项目中所有的电机在进行运动控制以前，需要完成电机驱动器的参数配置，一旦完成一个电机驱动器的参数配置后，从 WorkBench (科尔摩根官方调试软件) 中导出该配置参数，其他需要配置同样参数的电机驱动器直接导入该配置参数文件进行微调即可，不需要对每个电机驱动器逐个配置参数。

### 5 控制系统软件架构设计

项目中束诊探测器运动系统软件架构见图 4 所示。整个架构采用基于 OPC UA 协议<sup>[7]</sup>的 C/S(Client/Server) 内嵌套 C/S 结构，即在 C/S 结构内部又嵌套另一层 C/S 架构。这种中间层的 C/S 架构设计可以很方便地实现控制命令的进一步解析，使得系统维护更加方便，可以实现 OPC UA 控制变量名统一命名和统一管理，同时方便上位机开发。上位机 OPC UA 客户端采用 LabVIEW 软件实现。中间层同样采用 LabVIEW 软件实现，保证同一种软件在命名方式以及控制命令的编写具有统一性。使软件更新以及将来客户端编写语言更换方便且变量名容易修改，使得软件冗余度提高。而服务器端程序使用 TwinCAT 软件编程开发。由于其专业的运动控制背景，所以在控制功能实现上更加方便。所有运动控制相关命令在服务端以 OPC UA 变量的方式完成发布。



图 4 (在线彩图) 束诊探测器运动系统软件架构

同时在服务器上运行中间层的 C/S 程序，这样远程 OPC UA 客户端需通过中间层来与真正的 OPC UA 服务器实现数据交互。由于束诊探测器种类多，因而控制模式也呈现多样化。针对此特点，在服务器端开发了基于不同探测器的运动控制模块，且对于所有的探测器运动控制，电机的运动状态和电机执行的动作均封装到

运动控制模块中，当探测器执行具体的动作时，会调用库文件中的子模块(程序)和运行参数，并通过执行对应的状态机将这些子模块与子函数组织起来，实现探测器某一运动的控制。

### 6 运动控制系统主要实现功能

束诊探测器运动控制主要分为单轴运动和多轴运动控制，单轴运动主要实现探测器标定、寻找原点、在线、离线运动以及状态监测，控制拦截式探测器实现束流参数测量，而多轴联动控制除了实现所有单轴运动控制功能外，还需要实现探测器系统中多个电机的协调联动。例如，在双狭缝探测器运动控制系统中，需要保证两个狭缝单独运动的同时，还需要根据具体要求自动设置狭缝宽度，同时，剥离膜运动控制系统也属于多轴运动控制系统，该系统主要通过控制不同的电机按顺序运动实现自动换膜功能。下面将对该系统实现的主要功能进行说明，主要包括实现过程以及实现方法。

#### 6.1 单轴运动控制功能

该功能主要在探测器测量束流参数时控制探测器插入束流管道特定的位置，在测试完成后将探测器拉出。在运动过程中，可以随时停止运动。并且运动速度、运动位置、加速度等参数可调。该功能主要通过调用已经完成封装的子模块 MotionControl1 与 MotionControl2 来实现，而这两个子模块主要通过使用 TwinCAT 软件库中的 MC(Motion Control)2.0 库函数来搭建，通过调用相应的函数来组合封装为以上两个子模块，这两个子模块主要实现不同的运动功能，最终在主程序内可以根据探测器实际数量任意调用子模块进行实例化来实现控制系统设计。具体实现流程图如图 5 所示。

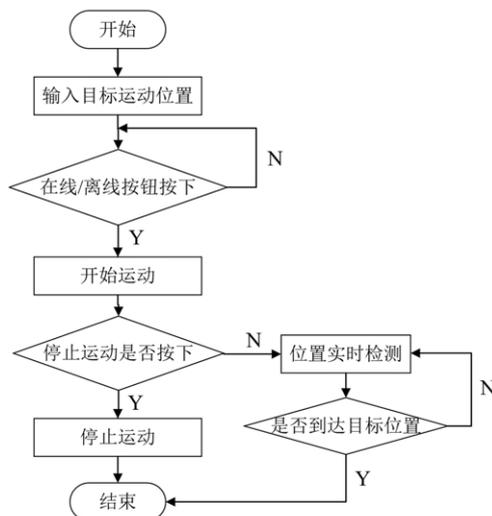


图 5 探测器单轴运动功能流程图

在封装子模块中主要调用MC2.0库中的以下运动控制函数,调用MC.Power函数用于控制电机使能,MC.MoveAbsolute函数用于绝对运动,MC.ReadActualPosition函数用于编码器实时位置读取,MC.Stop函数用于停止运动,MC.Reset函数用于电机出错后重置。在程序中,在子模块中依次调用这几个函数并且进行实例化,比如先要调用使能函数完成电机使能,然后再调用绝对运动函数,最终实现单轴运动功能。

为了测试探测器运动控制系统的精度能否满足要求,我们进行了两项测试。

### 6.1.1 探测器运动线性度测试

为了测试探测器运动线性精度,在探测器行程内均匀取8个位置点,让探测器从原点运动到目标位置,再对安装在探测器上的电阻尺电压(电压范围0~10 V)进行多次采集,为了消除电源纹波带来的误差,对采集数据进行统计分析,求平均值,以减小测量不准确性RMS的影响。处理后的数据如表2所列,最后使用处理后的数据对电阻尺电压与设定位置关系进行线性拟合,拟合结果如图6所示。

表 2 探测器电阻尺标定数据

探测器位置/mm	电阻尺电压/V
0.000	1.878
10.000	2.577
20.000	3.283
30.000	3.987
40.000	4.697
50.000	5.412
60.000	6.139
70.000	6.984
80.000	7.669

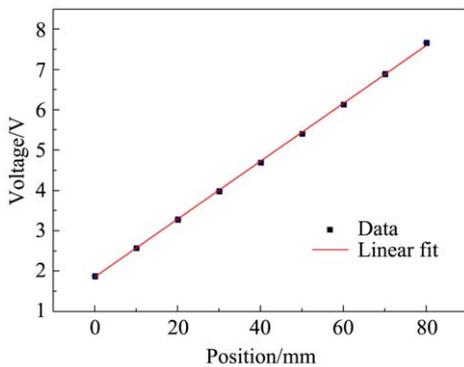


图 6 (在线彩图)探测器电阻尺电压与位置拟合结果

图6中拟合公式为:  $y = kx + b$ , 其中拟合直线斜率  $k = 0.07177 \pm 3.9063 \times 10^{-4}$ ,  $b = 1.86089 \pm 0.01536$ ,  $Pearson's r = 0.9999$ 。这项测试的目的在于测试机械

结构带动电阻尺的电压值与设定位置的线性度。从拟合结果可以看出在该电机运动系统控制下探测器机械结构运动线性度相关系数可达0.9999,可以完全满足使用要求,因为正式使用时,位置反馈信息使用的是精度更高的电机编码器反馈值,而电子尺位置反馈只是作为参考,防止电机出现空转。

### 6.1.2 探测器电机运动控制精度测试

将电机与探测器相连接,从探测器行程内均匀取5个位置,然后让探测器从原点开始运动到设定位置,采集电机编码器反馈值。为了更加精确地测试其重复精度,在每一个位置上分别测试120个数据,最后使用误差棒作为权重对每一个位置的120个测试数据与设定位置(Set position)进行线性拟合,来表征带探测器电机的测量精度,拟合结果如图7所示。将每个位置的120个编码器位置(Encoder position)进行统计分析,计算相应的均方根误差,结果如表3所列。

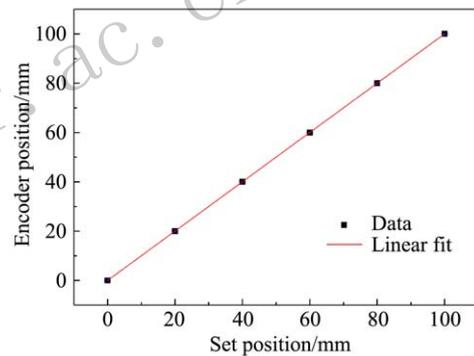


图 7 (在线彩图)探测器编码器与位置拟合结果

表 3 探测器电机编码器测试数据

设定位置/mm	编码器位置/mm	均方根误差 $\sigma$ /mm
0.000	-0.000004	1.99954E-05
20.000	19.999995	2.09986E-05
40.000	39.999997	1.54027E-05
60.000	59.999996	1.98246E-05
80.000	79.999995	2.03799E-05
100.000	99.999976	2.20155E-05

图7中拟合公式为:  $y = kx + b$ , 其中拟合直线斜率  $k = 1 \pm 5.374 \times 10^{-7}$ ,  $b = 2.37202 \times 10^{-5}$ , 可见线性度非常好,测量位置误差好于0.1  $\mu\text{m}$ , 误差精度完全满足设计要求。

## 6.2 寻找原点控制功能

现场探测器均安装前后光电开关作为安全限位,同时安装机械限位作为光电限位失效后的保护。由于伺服电机使用相对编码器,在驱动器掉电以后会导致之前位置信息丢失,所以在重新恢复使用前需要位置初始化。

寻找原点时，探测器将以后限位开关作为参考原点，实现自动寻找原点功能，具体实现流程如图 8 所示。

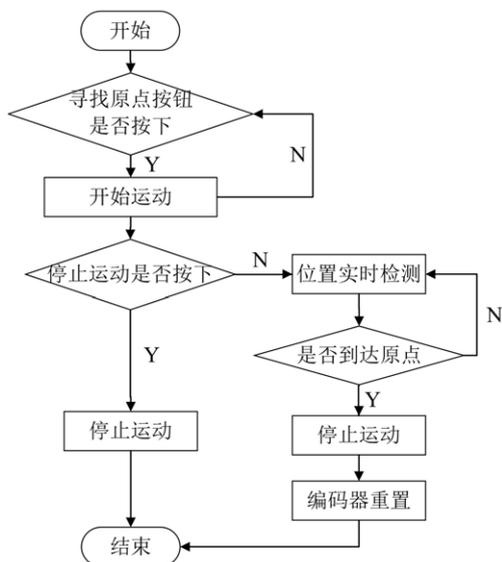


图 8 探测器寻找原点功能流程图

实现该功能除了调用 6.1 节单轴运动的功能以外，还需要调用 MC2.0 库中的函数 MC\_SetPosition 用于检测到限位以后重置编码器位置。设计的关键点在于需要按流程图 8 显示的逻辑顺序来调用不同的函数来完成代码编程以实现整个寻原点功能。

### 6.3 多轴运动控制功能

多轴运动控制是控制器通过程序控制来实现多个电机的联动来实现特定功能。同时每个电机均可单独实现上述两种运动控制。下面就以项目中的剥离膜运动控制系统为例进行说明，在该运动控制系统中主要通过远程控制四个电机轴联合运动在真空盒内实现自动更换剥离膜的功能。四个轴分别为主轴、转盘升降轴、转盘旋转轴、定位轴。整个运动控制流程如图 9 所示。

为实现该功能，每一个电机的运动控制都调用 6.1 节中单轴运动的功能块，而在整个自动换膜的逻辑顺序处理上，将图 9 所示的流程图设计为一个状态机，因为该功能中每一步运动都受到上一步的制约，只有当上一

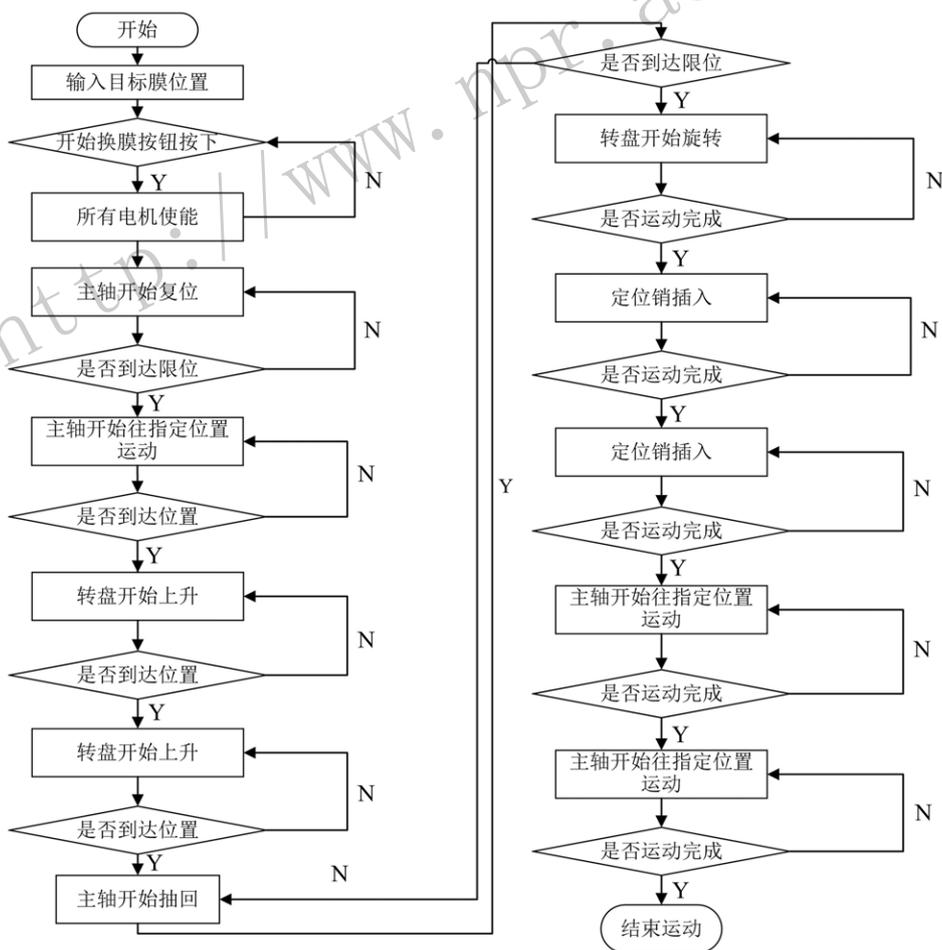


图 9 剥离膜多轴运动系统流程图

步动作顺利完成以后, 才会进行下一步动作, 直至最后一步完成, 返回换膜成功信号。所以, 用状态机来实现该功能较为方便。

在具体程序实现时, 将每一个电机的每一步运动控制都独立出来, 分块进行设计, 并且将需要运动的位置

进行预置。而每一步运动执行的触发采用上一步运动完成输出的信号。这些完成以及触发信号通过一个 case 结构内嵌多个 if 语句来实现的状态机来控制, 逻辑结构清晰、简洁, 方便维护与升级。多轴控制的剥离膜程序界面如图 10 所示。



图 10 (在线彩图) 剥离膜控制系统界面

## 7 结论

该控制系统驱动探测器测量结果显示, 拟合直线斜率  $k = 1 \pm 5.374 \times 10^{-7}$ ,  $b = 2.37202 \times 10^{-5}$ , 具有较好的线性度, 同时测量位置误差好于  $0.1 \mu\text{m}$ , 误差精度完全满足要求。该控制系统在该项目运行期间, 利用此运动控制架构和基于该框架开发的运动控制系统实现了项目中所有束流诊断移动式探测器的运动控制, 经过两年的在束使用, 整个系统运行稳定, 可以达到 HIMM 束流诊断拦截式探针的运动控制系统设计指标。同时使用基于 OPC UA 协议的中间层客户端/服务器架构的系统设计方案, 方便系统中新功能的增加以及内部 OPC UA 变量命名更改, 同时方便采用任何软件实现上位机界面开发。使得系统具有较高的可扩展性。

### 参考文献:

- [1] SONG Mingtao, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* Nuclear Physics Review, 2001, 18(2): 116. (in Chinese)
- [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] CERFF K, HAAS D, JAKEL D. *et al.* Setup and Diagnostics of Motion Control at Anka Beam Lines[C]//Proceedings of PCaPAC2014, Karlsruhe, Germany, 2014: 198.
- [4] WITTENBURG K. Beam Size Measurements Using Wire Scanners[C]//Topical Workshop on Emittance Measurements for Light Sources and FELs, Barcelona, Spain, January 29-30, 2018.
- [5] LI Min. The Design and Implementation of Front-end Control System of Beam Diagnostics for Heavy-ion Accelerator[D]. Lanzhou: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences(IMP) 2015: 91. (in Chinese)  
(李敏. HIMM束流诊断前端控制系统的设计与实现[D]. 兰州: 中国科学院研究生院(近代物理研究所) 2015: 91.)
- [6] BeckHoff. Embedded PC CX [EB/OL]. [2019-05-15]. <http://www.beckhoff.com.cn/>. 37(12): .
- [7] MIN Xiaoshuang, YANG Xin. Information technology and Network security, 2018, 37(12): 71. (in Chinese)  
(闵晓霜, 杨鑫. 信息技术与网络安全, 2018, 37(12): 71.)

## Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector

LI Weilong<sup>1,2,1)</sup>, LI Shengpeng<sup>3</sup>, LI Min<sup>2</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

3. Lanzhou KeJin TaiJi Corporation, LTD, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** It is necessary to measure beam parameters with beam diagnostics detectors for HIMM(Heavy Ion Medical Machine), most of which are interceptive detectors that will be inserted into the center of the beam pipeline while measuring the beam parameters and be pulled out when the measurement is finished. Furthermore, some of the detectors need to be controlled harmonically. In this paper, the architecture of the motion control system is designed and implemented based on the EtherCAT protocol. The client-server software system based on OPC UA protocol is developed and tested with beam. The motion control system of all beam diagnostics detectors has passed the verification of the CFDA(China-Food and Drug Administration) and been running since 2017 with beam. The results show that the system is of high stability and transplantability characters, the control accuracy and control mode can fully meet the application requirements.

**Key words:** Heavy Ion Medical Machine; EtherCAT protocol; OPC UA protocol; LabVIEW; TwinCAT

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

---

**Received date:** 3 Jun. 2019; **Revised date:** 5 Jul. 2019

1) E-mail: [lwl1228@ipmcas.ac.cn](mailto:lwl1228@ipmcas.ac.cn).