

文章编号: 1007-4627(2024)02-0761-08

核能开发加速器质谱仪控制系统的研制

陈子忻, 李康宁[†], 郭巍, 游曲波, 包轶文, 何明, 邵斌

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 核能开发加速器质谱仪是由中国原子能科学研究院自主研发的加速器科研装置。该装置采用了真空绝缘的高压注入方式, 克服了大气绝缘型质谱仪体积大、建造成本高以及存在高压安全隐患的弊端。同时, 对于 15 MPa 的剥离气体注入, 采用 PID 控制回路, 精度达到 0.1%; 离子源靶锥控制采用伺服电机驱动, 且具有微调功能, 微调精度达到 0.04°。控制系统功能完善, 针对高精度测控需要, 采用了 16 bit 的西门子 1500 PLC 架构; 同时强化了安全联锁设计, 增强了装置的安全可靠性。设计完成的质谱仪结构紧凑, 占地面积小, 控制精度高。经过长时间运行表明, 控制系统稳定可靠, 满足了装置的各项功能要求。

关键词: 加速器质谱仪; 闭环反馈控制; 剥离气体控制; 换靶控制

中图分类号: TP273; TL505 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.41.2023083

0 引言

加速器质谱仪 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) 是迄今测量长寿命放射性核素灵敏度最高的分析技术, 在核技术、天体物理、环境监测、生物医药等领域得到了较为广泛的应用^[1]。近年来, 中国原子能科学研究院在 AMS 装置国产化研究中取得了良好的成果, 在轻核素的探测方面取得了重要进展。目前, 实现了由大气绝缘型向真空绝缘型的转变, 使得 AMS 装置体积更加紧凑、技术水平更加先进^[2]。

1 控制系统总体结构

为满足核能开发加速器质谱仪的自动化控制需求, 研制出了一套全面的自动控制系统, 其功能主要是实现对设备的远程和就地控制。此外, 在以往经验的基础上, 重点强化了自动联锁和故障诊断等功能^[3]。在以往加速器安装过程中, 由于所需控制的设备过于集中, 在安装调试和日常运行过程中维护效率低下, 为此, 控制系统建立了分布式控制网络, 将系统进行了模块化设计, 各个子系统运行期间互不干扰, 有效解决了上述问题, 提高了检修效率, 保证了加速器质谱仪长期稳定运行。

根据现场环境中电位的不同以及数据传输实时性要求的不同, 离子源工作电压为高电位, 其余设备均为地电位, 将原有的三个电位改为两个电位, 分别是 80 kV

离子源高压台架子系统和地电位子系统。80 kV 离子源高压台架子系统中包含对离子源配套的各个电源的控制、换靶控制以及辅机控制。地电位子系统中包括辅机控制、束线供电控制、法拉第筒和束流测量控制以及其它各种电源, 如主高压电源、预加速电源、分析磁铁电源等。两个子系统通过以太网以及信号线连接实现了就地和远程控制功能^[4], 系统结构如图 1 所示。考虑到各个子系统相互联系又能各自独立运行, 设计了以交换机为中心的星型网络结构来实现控制。各子系统通过以太网交换机与控制室上位机进行通信, 完成控制系统中各项控制和监测任务。为保证高低电位直接的隔离以及系统中数据传输效率, 采用光纤作为传输介质对各子系统之间进行数据传输。

2 控制系统硬件设计

在加速器控制系统中, 测控任务与普通工业控制有很大不同, 如存在 300 kV 的高电压、15 MPa 的高气压以及 10^{-5} Pa 的高真空等的复杂现场环境, 信号稳定性要求高, 运行时间长等。在这样的条件下应选用经得起检验的成熟的器件。

根据加速器长期稳定运行的要求, 需要选择既具有安全稳定性能, 又对现场高压等复杂环境有良好适应能力的底层硬件。控制系统在硬件选型上进行了以下几方

收稿日期: 2023-09-27; 修改日期: 2023-12-27

基金项目: 国防科工局核能开发项目 (FA202312-000201)

作者简介: 陈子忻 (1998-), 男, 江西九江人, 硕士, 从事核技术及应用研究; Email: 769952262@qq.com

[†] 通信作者: 李康宁, Email: likangning@126.com

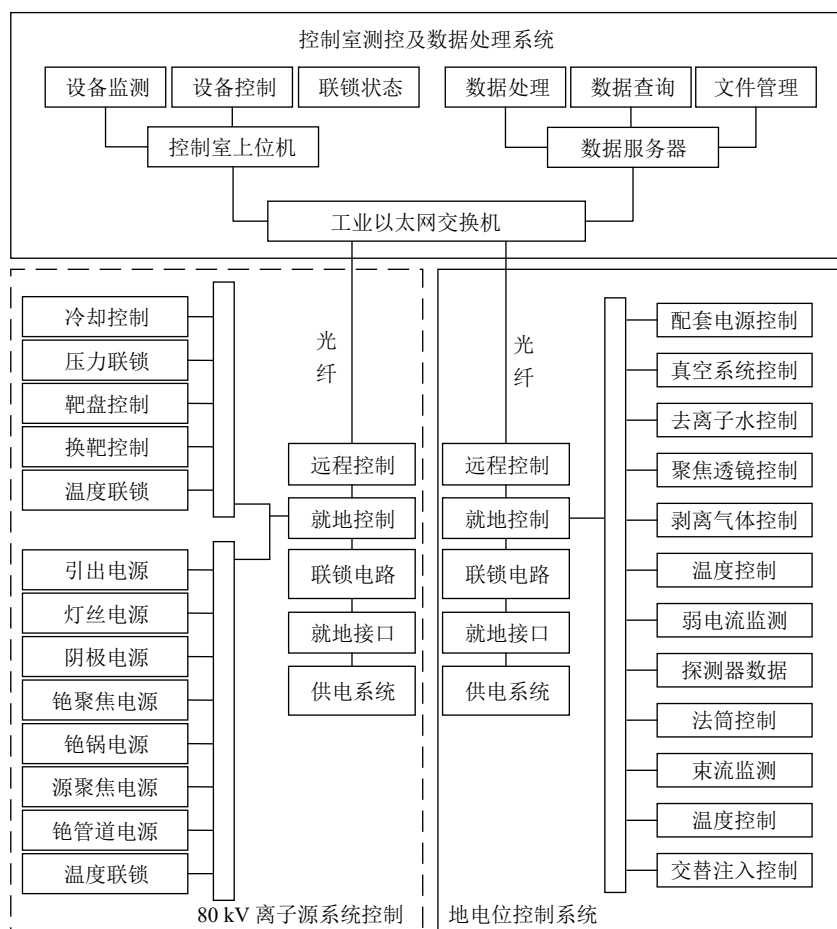


图 1 系统结构图

面的考虑:

1) 选用成熟可靠的硬件。由于主高压电源、导向器电源以及透镜电源均采用精度为 6×10^{-6} 的 Heintzinger 电源, 该种电源对模块的响应速率以及稳定性有较高的要求, 因此 CPU 选用西门子 S7-1513-1 PN, 该 CPU 信号处理速度快, 位操作时间为 40 ns, 同时具有 16 bit 控制精度, 在抗干扰方面具有 2 kV 的浪涌保护, 能保证控制系统运行时快速处理复杂数据。同时具有开放式用户安全通信, 可通过传输协议 TCP/IP 协议与上位机进行连接[5]。

2) 建立简洁高效的测控网络。随着信息技术的发展, 大部分设备具有 TCP/IP 协议的通信接口, 优先选用带有这种协议接口的设备器件。这样一来, 组网更加简洁, 调试更加简便, 同时也减少了中间转换, 节约了控制系统建造成本。

3) 抗干扰方面的考虑。质谱仪应用现场是具有高气压、高电压、高真空的三高环境, 为应对多种因素带来的干扰, 在设备选型时选用具备隔离及抗干扰能力强的成熟的设备器件, 保证控制系统的安全稳定。

系统中所包含的数字量和模拟量通过西门子 S7-

1513PLC 及其配套的 I/O 端口进行控制, 如机械泵的启动停止, 法拉第筒的提起放下, 高压电源输出的开启关闭等开关量。其中, 部分电源可以直接通过网口直接接入主交换机与上位机通信, 如离子源和束线控制中所使用的 Sorensen 电源等。由于系统设备器件众多, 存在着如 RS232、RS485 及 ModBus 等通信协议的设备, 这些设备通过串口设备联网服务器接入主控网络, 如真空计、高斯计及分子泵电源等[6]。

2.1 就地控制

就地控制可以实现现场对各个设备进行调试、控制以及紧急情况的快速停机。安装维护期间可以通过就地控制实现调试功能, 所有设备均通过就地控制调试后才能转为远程控制。遇见突发状况时, 可通过对供电柜、真空设施以及管道阀门等设备的就地控制来实现局部束流管道的关闭, 保障其余部分真空不受影响来保护设备。在具有就地控制功能的设备上设有就地/远程切换开关, 可以进行两种模式的切换。同时, 就地设备的状态不仅在控制柜上进行显示, 还会发送到上位机控制界面中显示, 以防止工作人员误操作。

2.2 离子源系统控制

离子源选用的是中国原子能科学研究院自主研发的多靶强流铯溅射负离子源。该装置处于离子源高压台架上,通过80 kV隔离变压器为台架上的设备提供220 V的交流电。为达到电气隔离和便于控制的目的,组装了两套由PLC组成的就地控制箱分别对离子源电源部分和靶盘进行控制,两个控制箱与上位机采用光纤通信以实现电气隔离,其控制结构图见图1系统结构图中80 kV离子源台架子系统部分。第一个控制箱内包含的是对于离子源及配套电源的控制,其中PLC选用的是西门子S7-1500系列。第二个控制箱内包含的是对于换靶控制以及辅机部分的控制,选用的是西门子S7-1200系列。

2.2.1 配套电源控制

离子源配套电源是离子的产生、聚焦、引出以及铯蒸气的挥发等所需要的电源,包括阴极、引出、铯聚焦、铯锅、铯管道、源聚焦和灯丝电源。其中灯丝电源和铯锅电源使用的是AMETEK公司的Sorensen电源,剩余电源均使用的是Glassman电源。Sorensen电源是通过LXI接口直接接入交换机,再通过上位机进行控制的,其自带显示屏和调节旋钮可以直接实现就地控制。而Glassman电源则是通过模拟量信号与就地控制柜中的PLC模块进行连接,由模拟量输出对电源参数进行调节,同时通过模拟量输入信号将数据经PLC数据块传输至上位机显示,以达到监测控制的目的。在进行束流调节时,就是通过调节这7台电源输出参数,使得束流强度在第一个法拉第筒处达到最大值。此外,根据以往的调试经验新添加了额定值联锁保护,防止操作人员误操作导致设备损坏。

2.2.2 换靶控制

换靶控制是离子源的重要组成部分。实验时需要通过控制靶盘进行束流种类的切换,换靶精度直接影响到输出束流的品质。由于之前所使用的NEC公司生产的离子源,采用气动换靶,存在着气路易堵塞、换靶易出现偏差、换靶速度较慢等问题。中国原子能科学研究院针对这些问题研制出一套更为先进的多靶强流铯溅射负离子源,采用了伺服电机驱动,克服了原有离子源的弊端,靶位精准、换靶速度快以及具有微调功能,微调精度可达 0.04° 。由于离子源控制机柜处于高压电位,空间紧凑,为此专门研制了体积小功能全面的控制箱,采用了西门子S7-1200系列PLC、就地控制触摸屏、伺服驱动电机、气动驱动元件以及状态指示等辅助器件,实现了更换靶盘以及换靶等多种功能。

2.3 气体剥离控制

在气体剥离设计中,需通过减压阀与氦气瓶进行连通,经过减压的氦气以高压的形式馈入到气体剥离管道中对气体进行剥离,但常规的减压阀无法对气体进行精确控制,调节时容易出现误差^[7-9]。同时,剥离管道处于0.2~0.4 MPa的高气压环境下,易产生故障,需保证管道处于一个稳定的气压环境下,其控制难度较高对气体控制的稳定性提出了新的要求。因此设计出一套减压控制系统,对输入到剥离管道内的气压进行控制。选用TESCOM公司的ER5000电子压力控制器作为控制器,该控制器可以提供从真空至206.8 MPa的压力控制,气体流量最高可达Cv12,其控制精度能达到0.1%。此外,该控制器可以实现PID闭环控制,且具有25 ms的更新速率。通过上位机设定P、I、D的增益选择适当的参数,使系统获得最佳响应速度、稳定度以及灵敏度等性能。上位机只需设定各个增益值,系统即可自动运行。同时,传感器的反馈信号直接发送给控制器,简化了上位机的计算和结构。气体控制信号图如图2所示。

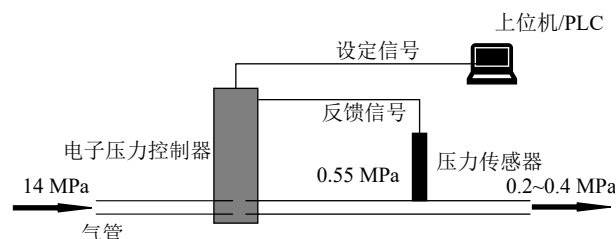


图2 气体控制信号图

2.4 联锁控制

控制系统中联锁控制是保障设备和人员安全的重要组成部分。此次设计的联锁控制中包含了真空联锁、高压电源模块联锁、高压联锁、温度保护等联锁控制,从全方位对人员设备的安全进行保护,提高装置整体的安全性。联锁逻辑图如图3所示。

磁铁电源温度保护联锁主要是通过磁铁上的热敏电阻和可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)来实现联锁的,当磁铁温度过高时,热敏电阻等效成导线,给PLC一个数字量输入,在底层PLC程序中运行,将磁铁电源输出降低至0。同时,上位机软件中弹出提示框“磁铁温度过高”,并进行声光报警。待磁铁温度恢复后,关闭提示框。

真空联锁是对整个系统的真空环境进行保护,在系统各处设有多台真空计对系统内真空度进行实时监测,同时真空计计数会在上位机软件中显示。当真空度突然变差时,上位机软件中弹出提示框“真空度变差,真空

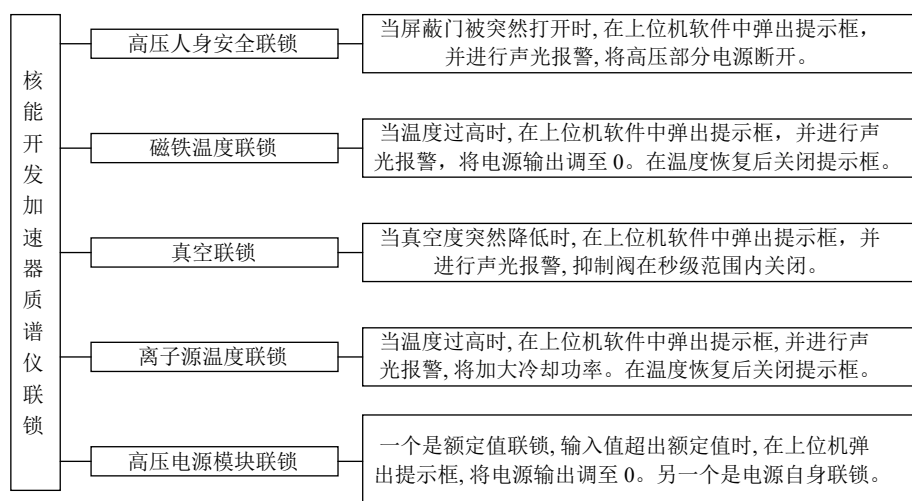


图 3 联锁逻辑图

破坏”，并进行声光报警。系统内各个抑制阀将在秒级范围内关闭，以避免破坏整个加速器系统的真空。再对相应位置的真空进行检修，在其恢复真空后，将抑制阀打开，与其他部分相互联通。

高压人身安全联锁是质谱仪控制系统联锁设计中的重要内容，系统实现了高压电源自锁以及主加速电源与离子源高压台架的硬联锁，保障了人员设备的安全。因此对高压部分设计了三种联锁来保证人员设备的安全。一种是高压电源自身所带的联锁，为一个开关量，当联锁开关量闭合时，表示联锁已投入运行，可以正常对高压进行操作。另一种则是高压屏蔽门联锁。高压屏蔽门联锁是高压台架外部的保护措施。主要是为了防止装置在加高压时，有人员进入受伤害。当装置加高压时，通过门磁监测，对屏蔽门进行监测，若被人从外部打开屏蔽门，自动切断高压电源，并在上位机上弹出提示框“屏蔽门已开启”，并进行声光报警。最后一种则是在软件中进行额定值联锁，如若设定值超过额定值，则在软件中弹出提示框“超出额定值”。该联锁主要是防止操作

人员误操作导致电源损坏，保证了设备和人员的安全。

3 控制系统软件设计

结合以往开发控制系统的经验，选用具有丰富的库函数及图形控件的虚拟仪器开发工具——LabWindows/CVI (美国NI公司开发的面向计算机测控领域的虚拟仪器软件开发平台)作为上位机主控程序的平台，配带数据库和分析工具以及在TIA Portal(西门子工业自动化集团发布的一款全新的全集成自动化软件)上编写的下位机程序。

3.1 上位机程序

上位机程序包括控制室主程序和数据库两个部分。由底层PLC进行循环数据采集，经处理后发送到上位机中，在主控程序界面中进行设备状态和数据的显示。工作人员通过对控制界面的操作来实现对各个设备的控制。控制室主程序主要实现了对系统设备监控、联锁报警、主要流程控制以及故障处理等功能。控制软件架构如图4所示。

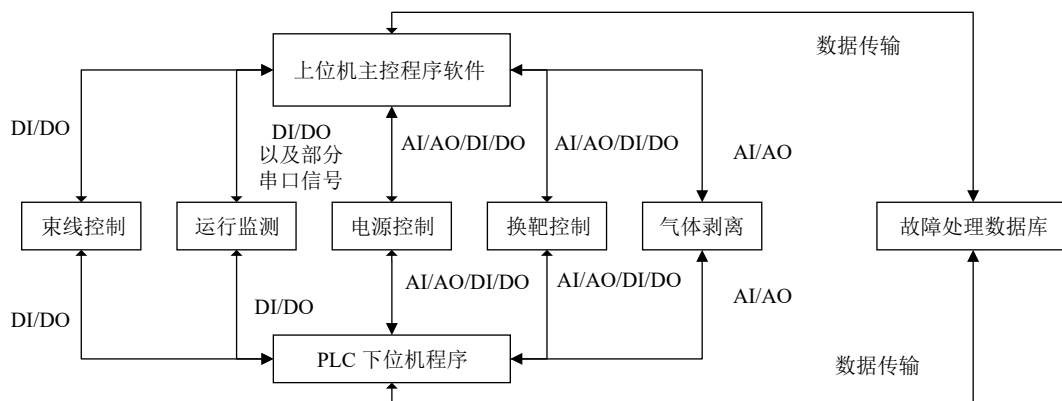


图 4 控制软件功能结构图

操作界面是按照全面、整洁、便捷的理念进行设计的，与实际功能需求相对应，设计出主控界面、电源控制界面、故障诊断界面、换靶控制界面、气体剥离界面以及数据处理界面。在界面中运用了下拉菜单、图形控制等

的功能，使得整个控制程序既全面又便于操作。除此以外，还设置了设定确认部分，在一些重要控件进行设置时，加入对话框“是否确认此操作？”，以防止人员出现误操作。系统在上位机软件编写操作界面如图 5 所示。

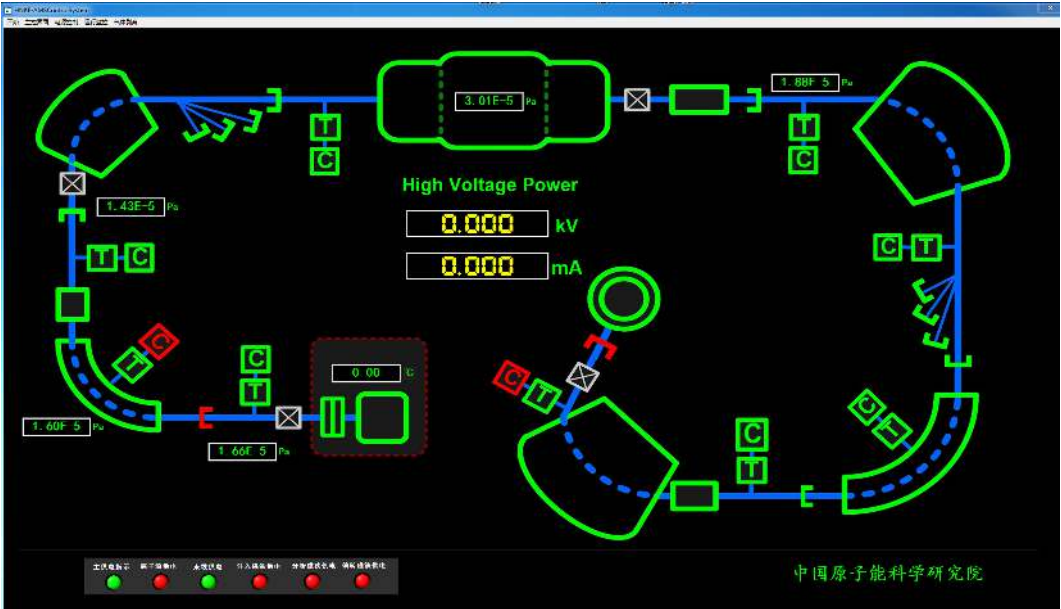


图 5 控制系统主界面

配备了换靶控制界面对离子源进行换靶控制，对换靶控制流程进行了规划，其控制流程图见图 6。开始换靶控制前，先进行自检和联锁检查，在确保设备正常后再选择操作模式，若设备故障则进行报警提示。在满足各种联锁条件的情况下，目标靶号与当前靶号进行比较，如果不同，软件通过最优算法判断正反转，直至目标靶号与当前靶号相同，提示换靶完成。同时，根据实际束流测量结果比对，系统具有靶盘微调及位置校准的功能，比之前 NEC 的离子源有了明显的改进。就地控制时，可通过箱外嵌入的西门子 HMI 显示屏进行触控操作，该显示屏也可实现对靶盘的控制、隔离阀的开关以及轴向气动伸缩等功能。同时，换靶控制具有调零功能，如果在实验过程中发现误差可以通过调零来使靶锥恢复零位，调整精度后再进行实验。此处新添加确认界面，其主要目的是防止误操作，导致靶盘或靶锥被损坏[8]。操作界面如图 7 所示。在操作开始时，先将离子源箱与上位机进行通信，再输入所需靶号即可自动换靶，待界面中显示换靶成功后，对照目标靶位与样品元素是否正确，若正确则继续剩余实验步骤，若不正确则继续调整，直至与所需完全一致。

3.2 下位机程序

下位机程序使底层 PLC 对各个硬件设备通过数字

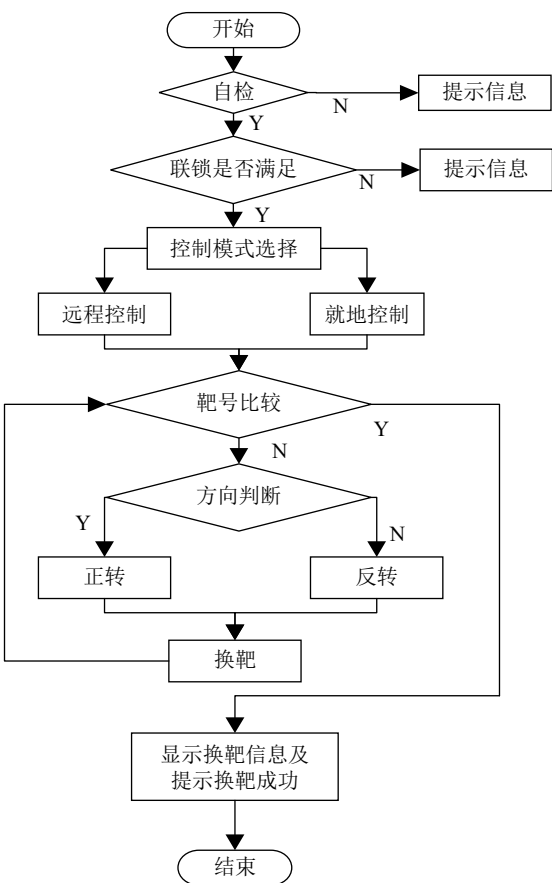


图 6 换靶控制流程图



图 7 换靶控制界面图

量或模拟量进行控制。该程序是基于 TIA Portal V17 环境下进行开发的。参考之前所编写的程序并结合实际需求,实现了对现场数据中的模拟量以及数字量快速循环采集,并与上位机程序通过 TCP/IP 协议进行通信,在经过必要的数据处理后将数据传输至上位机中。主函数 OB 模块通过调用通信模块 TSEND_C 实现向上位机发送数据,调用 TRCV 模块来接收上位机的数据。然后,调用了 MOVE 模块将发送和接收的数据对数据块内数据进行赋值和调用。为提高系统的可靠性,设计了将模拟量和数字量输出在发送至下位机的同时返回至上位机,

在上位机出现故障需重启时,可以将模拟量和数字量输出重新发送,实现数据保持功能。

3.3 故障诊断数据库

故障诊断数据库主要用于实时记录系统运行参数的操作、对故障信息的储存以及数据保持功能的实现,采用了美国 Microsoft 公司的 Microsoft SQL Server 2019 数据库软件进行开发,通过上位机程序进行操作。主控界面除了加速器的测控,同时显示故障及联锁保护状态,通过主控界面可以随时掌握加速器的整体运行状态。

故障诊断数据库集成到加速器控制系统的数据库中,实现的主要功能如下:

首先,实时记录系统运行参数。进行权限验证,当参数改变时,将操作人员、时间、操作内容等写入运行日志。另外,当故障及联锁保护状态改变时,写入故障运行监测日志。

其次,故障报警及检修处理提示。在发生故障时,对故障点根据故障等级采取声光电报警提示,同时对于故障现象结合加速器长时间运行数据,进行精确或者模糊检索,根据故障的相关性给予检修处理提示。

最后,检索及统计分析功能。对系统运行期间的运行状态提供多种条件的检索统计功能,例如:按束流种类、束线、能量等等。故障及联锁保护等信息的统计将对加速器的运行状态有更好的把控,可以根据统计信息提供检修建议等。

4 抗干扰设计

由于加速器质谱仪所处的运行环境中存在高电压,且较为密闭,导致干扰源较多,包括加速器真空放气引起的高压波动、主高压部分电压过高引起的高压打火或放电现象等。因此,在设计时需采取各种抗干扰措施来应对。在控制系统设计时,从软件和硬件方面都采取了相应的抗干扰设计。

1) 硬件抗干扰设计

结合现场实际环境,在硬件选型方面更侧重选择带有隔离功能的硬件设备。数字量的控制采取增加中间继电器的方式,将现场设备与信号获取设备隔离,增加控制器件的安全性。另外,硬件布线时,选用双层屏蔽线缆,与电源电缆隔开分别走线,使其不接触。在接地方面,设有 12 个机柜,各机柜都设有独立的地线端子排用以接地。此外,对通过数字量进行控制的设备设计了到位信号保护,即设备在接收上位机发送的控制指令运行时,需在到位后向上位机发送到位信号,方可进行下一步操作。而模拟量信号部分则是在其输入通道中加入

电容元器件, 过滤部分高频干扰^[10]。

2) 软件抗干扰设计

对于系统的输出信号设计了数据保持功能以应对干扰。该功能是通过PLC进行程序编写来实现的, 将正常运行时的监测数据保存到数据块(DB块)中, 当主程序每次执行操作时, 对数据块整体进行覆盖, 再通过移动模块对数字量输出部分进行赋值。对于非PLC测控信号, 则是借助上位机中的数据库部分进行数据保持与恢复。在系统异常停止时, 将运行的运行数据进行保存, 待主程序重新启动时, 在保障安全的情况下, 将运行数据进行恢复, 实现数据保持功能。

在设备实际运行过程中, 对抗干扰部分进行测试, 目前测试效果良好。在高压打火后, 暂时没有设备受到浪涌冲击或破坏, 抗干扰设计较为有效。

5 总结

核能开发加速器质谱仪在以往的基础上, 克服了高压馈入技术、高气压剥离气体控制技术并搭建了更健全的联锁保护系统, 系统的自动化水平有了更进一步的提高。在剥离气体控制方面设计出一套针对高气压馈入的闭环控制回路, 实现了更加高精度的自动控制; 在主加速电压绝缘方面, 由大气绝缘变为真空绝缘, 提高了装置的技术水平; 在体积方面, 由于采用真空绝缘, 主加速段两端去掉了加速管, 使加速器更小型化; 在国产化方面, 实现关键部位的自主研发, 如多靶强流铯溅射离子源及其控制部件等, 大大提高了设备的国产化比例。

系统在研制过程中参考了以前的成功案例并结合相关实验要求对控制系统进行了技术提升和优化, 包括对剥离气体精度的提升、优化绝缘形式转为真空绝缘、缩减结构改成钢筒设计、自主研发多靶强流铯溅射负离子

源控制系统等, 提升了整个系统的安全性与实用性。新加入的故障诊断数据库也取得了较好的效果。目前, 控制系统经过长时间使用, 运行稳定且满足了装置的各项控制要求。

参考文献:

- [1] HE Ming, ZHAO Qingzhang, ZHANG Wenhui, et al. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(1): 54. (in Chinese)
(何明, 赵庆章, 张文慧, 等. *原子核物理评论*, 2022, 39(1): 54.)
- [2] HE Ming, BAO Yiwen, SU Shengyong, et al. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3): 784. (in Chinese)
(何明, 包轶文, 苏胜勇, 等. *原子核物理评论*, 2020, 37(3): 784.)
- [3] XUE Kangjia, CHEN Weidong, HE Yongcheng, et al. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(2): 214. (in Chinese)
(薛康佳, 陈卫东, 何泳成, 等. *原子核物理评论*, 2023, 40(2): 214.)
- [4] 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, 包轶文, 等. *原子能科学技术*, 2018, 52(4): 762.)
- [5] 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.)
- [6] LI Kangning, ZHANG Meng, YOU Qubo, et al. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2018, 26(4): 63. (in Chinese)
(李康宁, 张猛, 游曲波, 等. *北京石油化工学报*, 2018, 26(4): 63.)
- [7] ZHOU Yue, LI Kangning, YOU Qubo, et al. *Nuclear Physics Review*, 2019, 36(4): 426. (in Chinese)
(周月, 李康宁, 游曲波, 等. *原子核物理评论*, 2019, 36(4): 426.)
- [8] GUO Wei, LI Kangning, YOU Qubo, et al. *Nuclear Physics Review*, 2022, 39(3): 6. (in Chinese)
(郭巍, 李康宁, 游曲波, 等. *原子核物理评论*, 2022, 39(3): 6.)
- [9] WEI De, GONG Linghua, LIU Kexin, et al. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, 42(3): 324. (in Chinese)
(魏德, 巩玲华, 刘克新, 等. *北京大学学报*, 2006, 42(3): 324.)
- [10] 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.)

Development of Control System for Accelerator Mass Spectrometer in Nuclear Energy Exploitation

CHEN Zixin, LI Kangning[†], GUO Wei, YOU Qubo, BAO Yiwen, HE Ming, SHAO Bin

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

Abstract: The nuclear energy development accelerator mass spectrometer is an accelerator independently developed by China Institute of Atomic Energy. The device adopts a vacuum insulation and high-pressure injection method, overcoming the drawbacks of large volume, high construction cost, and high voltage safety hazards of atmospheric insulation mass spectrometers. At the same time, for the injection of 15 MPa stripping gas, a PID control circuit is used, with an accuracy of 0.1%. The ion source target control is driven by a servo motor and has a fine-tuning function, with a fine-tuning accuracy of 0.04° . The control system has complete functions and adopts a 16 bit Siemens 1500 PLC architecture for high-precision measurement and control needs; At the same time, the safety interlock design has been strengthened, enhancing the safety and reliability of the device. The designed mass spectrometer has a compact structure, small land area occupied, and high control accuracy. After a long period of operation, it has been shown that the control system is stable and reliable, meeting the various functional requirements of the device.

Key words: accelerator mass spectrometer; closed loop feedback control; stripping gas control; target switching control

Received date: 27 Sep. 2023; Revised date: 27 Dec. 2023

Foundation item: Technology and Industry for National Defence Nuclear Energy Development Project(FA202312-000201)

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