

文章编号: 2095-4980(2020)02-0334-05

医用回旋加速器控制系统设计

吴永存, 杨兴林, 石金水, 赵良超, 何小中

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 医用回旋加速器目前广泛应用于国防基础科学研究、同位素生产以及诊断、治疗等应用领域, 然而都无一例外地要求其稳定性、安全性。本文从医用回旋加速器的应用需求出发, 概述了控制系统的组成、各子系统的作用, 详细阐述了以 RX3i 可编程控制器为前端控制器的系统集成、高频系统的低电平控制的控制策略以及不同工作模式下各系统间的安全联锁。连续的运行结果表明: 控制系统保证了整个系统的平稳运行, 满足了加速器运行及其调试要求。

关键词: 回旋加速器; 控制系统; 系统集成; 低电平控制; 安全联锁

中图分类号: TN702; TP273; TL5 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2018339

Design of medical cyclotron control system

WU Yongcun, YANG Xinglin, SHI Jinshui, ZHAO Liangchao, HE Xiaozhong

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Medical cyclotron is widely used in the fields of national defense basic science research, isotope production, diagnosis and treatment. High stability and security of medical cyclotron system are required in these situations. Based on these application requirements, this paper outlines the composition of the control system, briefly introduces the role of each subsystem, and finally the system integration with RX3i programmable controller as the front-end controller, the control strategy of low-level control of high frequency system and the security interlock of each system under different working modes are elaborated in detail. The results of continuous operation show that the control system ensures the stable operation of the whole system and meets the requirements of accelerator operation and debugging.

Keywords: medical cyclotron; control system; system integration; low level control; safety interlock

正电子发射断层显像(Positron Emission Tomography, PET)是一种先进的核医学影像技术, 在美国、欧洲和日本, 18F-氟代脱氧葡萄糖(18F-fluorodeoxyglucose, FDG)PET 已先后纳入医疗保险范围^[1-2], 实现方法是将正电子核素标记到某种参与体内代谢的物质上, 形成放射性药物(也称显像剂、放射性示踪剂), 其具有很高的灵敏度和分辨力^[3]。

只有 PET 是完不成成像工作的, 它需要配套回旋加速器。在国内, 生产用于 PET 诊断的放射性同位素的回旋加速器几乎都是从国外进口的^[4]。医用小型回旋加速器是复杂且精巧的加速器设备, 而且大都安装在医院, 由非核专业人员操作, 所以该控制系统要求操作简单、运行稳定、高安全性。

正是基于以上需求, 中国工程物理研究院流体物理研究所建造的紧凑型医用回旋加速器商业样机, 其引出能量 11 MeV, 引出束流 50 μ A, 工作频率 72.12 MHz, 平均磁感应强度 1.18 T, 占空比可调节^[5]。该加速器要求控制系统实现对各个子系统的集中统一管理; 要求采用硬件与软件双重保护完成对各个子系统之间的安全联锁; 要求低电平控制系统对加速场幅度及相位精确度分别控制在 $\pm 1\%$ 和 $\pm 1^\circ$ 内, 实现对其前馈功率、反射功率、相位和腔体频率等的自动控制, 并实现与上位机用户界面系统的通信, 完成我国第一台 PET 医用回旋加速器的稳态控制。

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-01-08

基金项目: 核能开发科研资助项目(科工二司 2017-1341)

作者简介: 吴永存(1989-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为回旋加速器控制系统。email:yiranguw@ sina.cn

1 控制系统概述

控制系统的主要任务就是对加速器的工作状态进行监控和控制，并为操作人员提供运行参数和调束手段，使各子系统协调平稳运行，以得到理想的束流。医用小型回旋加速器控制系统包括真空控制系统、磁铁电源控制、离子源电源控制、高频控制、靶及引出系统控制、束流参数测量、碳膜及内靶位置控制^[6]、冷却水系统监控及联锁保护等组成。其控制系统总体结构图如图 1 所示。真空系统是加速器的基础工程，束流只有在真空环境中运行，才能保证足够的寿命，并且不断地被积累和加速，达到设计的能量(11 MeV)和流强(50 μA)，被加速的粒子与真空中的残余气体相互作用会导致束流寿命的缩短。实验数据结果表明，通入氢气后，真空度在 5×10^{-3} Pa 时，束流的传输效率在 42% 左右，后面对真空度的提高还将做进一步的工作。真空控制主要包括机械泵、分子泵的本地及远程控制、状态监控、真空度采集。其中，机械泵、分子泵需根据运行的时序逻辑、联锁保护逻辑进行启停控制；分子泵本地控制器的外控接点实现远程控制和状态监控；真空度通过真空计的模拟输出信号进行采集，真空度的高低状态通过真空计的接点输出信号作为联锁信号。真空度可以达到 6×10^{-4} Pa，但是需要时间较长；在实际实验中，真空度达到 $(1 \sim 2) \times 10^{-3}$ Pa 时，就可以进行打靶实验，如果只拆装离子源，达到这个真空度只需不到 1 h；进行打靶实验时，由于是对氢气分子进行作用产生质子，需通入 6 sccm 氢气，真空度约增加到 3×10^{-3} Pa，靶流 50 μA 。

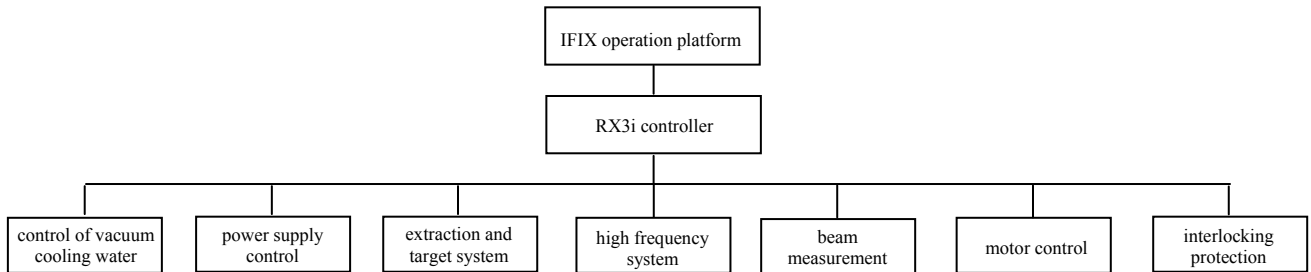


Fig.1 General structure diagram of control system

图 1 控制系统总体结构图

冷却水系统提供磁铁电源、加速器主体、靶系统等的冷却，保证整个系统的正常运行。将冷却水的温度、流量、电导率，循环泵的启停状态作为监控信号。

离子源电源为离子源起弧提供直流高压(指标：2 kV)。需实现其启停及电流缓升、缓降功能。离子源电源的停止作为联锁保护主要的保护手段。磁铁电源是加速器电磁铁的供电系统。调节磁铁电源的电流，可以改变磁铁的电磁场，从而控制粒子运动的轨道。要求 300 A 内连续可调，精确度 0.01 A。磁铁电源控制是通过磁铁电源的串口实现其加载、卸载、缓升、缓降及自动稳流功能。

高频系统为回旋加速器提供加速电场，而只有在电场中，带电粒子才能被加速或得到能量。高频系统的控制包括输出功率、反射功率、相位的采集，工作频率的扫描，相位及幅值稳定，打火判断及保护等。

引出系统：负氢离子打在碳膜上，负氢离子的两个电子被剥离，负氢离子变为质子，从而在磁场中的旋转方向发生改变，离子从围绕加速器中心回旋变为向外旋转，得以引出。

靶系统：由靶本体(加速器真空腔的末端密封、束靶相互作用时高温高压靶材的密封、束流的辐射屏蔽)、靶材配送系统(加速器运行前靶材的定量注入，照射完毕后同位素产品的输出)以及冷却系统(保证靶本体在束流辐照过程中处于合适温度，能够正常工作)构成。

内靶、碳膜等位置控制。内靶位置控制是为了测试沿径向的束流流强大小及束流损失情况，由运动控制装置与可更换的内靶构成，固定在铝制真空盒上，在磁极空谷内沿径向伸缩；碳膜位置控制，主要是为了调节碳膜角度，以便在实际打靶时，能够实时选择最佳碳膜角度，使靶流最大。这是为了满足加速器装置的调试、运行、打靶等不同工作模式的需要而设计的。

联锁保护系统保证人身、设备及操作安全。联锁系统分为硬件级的条件允许保护、软件操作保护两级。

2 系统集成性

所谓系统集成，就是通过结构化的综合布线系统和计算机网络技术，将各个分离的设备、功能和信息等集成到相互关联的、统一和协调的系统之中，使资源达到充分共享，实现集中、高效、便利的管理。

医用回旋加速器的应用场景，使得系统更需要集成控制，以期达到设备小型化、操作简单化。然而，

各子系统前端设备的特殊性,增加了系统集成的难度。其接口种类繁多,既包括了大量的数字、模拟接口,也包括有不同的串行通信接口;各子系统中还包含有顺序控制、过程控制、运动控制、信息控制、远程控制中的一种或几种。而数据采集与监视控制(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)系统是以计算机为基础的生产过程控制与调度自动化系统。它可以对现场的运行设备进行监视和控制,以实现数据采集、设备控制、测量、参数调节以及各类信号报警等各项功能,鉴于此,控制系统总体结构基于 SCADA 标准结构的数据采集与监控系统来实现^[7-8]。前端控制采用美国通用电气(General Electric, GE)公司 RX3i 可编程序控制器完成前端设备控制、参数测量及联锁保护功能;上位机采用 iFIX 组态软件平台实现过程监控、流程控制、数据存储与浏览,并可扩展为远程操作台。

基于以上选择,系统采用分布式控制架构,主控制器采用抗干扰能力强、运行稳定可靠的可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)对所有子系统和外部联锁进行控制。为了增强系统安全性和可靠性,控制单元对真空、水冷、屏蔽体门禁等一些重要信号进行监测,并将监测结果送入 PLC 的状态信息进行校对,发现问题,控制单元自动采取紧急保护措施,关闭相关子系统。iFIX 组态软件人机交互界面友好,而 RX3i 可编程序控制器具有很强的抗干扰能力,各子系统的有效集成,实现了整个加速器运行过程的控制和监测。

3 低电平控制

高频系统是加速器控制系统的重要环节^[9-10],其频率和相位的自动调节是保证束流同步加速条件的关键因素^[11]。低电平控制可避免直接接触高压的危险,为加速器的安全运行提供安全保障,然而,所采用的高频系统不自带低电平控制功能,需由 PLC 完成工作频率扫描、幅度稳定、相位稳定及打火保护等控制功能。

3.1 工作频率扫描

工作频率扫描分为初步扫描和精细扫描两个阶段。初步扫描以较低的激励电压(1.4 V)和占空比(10%),固定重复频率(998 Hz),从频率下限(72 MHz)开始以固定步长(10 kHz),逐步增加频率进行工作频率的扫描,找到腔压最大值对应的频率,工作频率的上限为 72.5 MHz。

精细扫描在初步得到的频率的正负 20 kHz 范围内进行,频率步进长度为 0.5 kHz。

3.2 相位稳定

相位稳定控制根据高频系统失谐程度^[12],采用不同的稳定策略达到相位稳定的要求。失谐程度分为严重失谐和轻度失谐。严重失谐判据为: $0.5 \times \text{入射功率} \leq \text{反射功率} \leq 0.8 \times \text{入射功率}$ 。此时,相位数据可能无效,程序会记录该事件。

采用的调整策略为:报警与历史趋势存储;降低占空比至 10%;升高频率,频率升高步长为(当前频率—初始频率) $\times 0.1$,若频率调节到初始频率时,还处于严重失谐(相位变正常但反射未降低),则将占空比降低为 1%,并重新启动扫描程序以确定频率。频率升高过程中,如高频已处于非严重失谐情况,恢复严重失谐时的占空比参数(占空比增加的步长为 1%),出现转入下述的轻度失谐或正常情况处理。初始频率为扫频阶段腔压最大对应的频率。

轻度失谐判据为: $\text{反射功率} < 0.5 \times \text{入射功率}$ 。采用的调整策略为:根据斜率算法进行频率调整。

斜率算法:相位 ϕ 与频率 ω 之间在谐振点附近遵循 $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\tan\Delta\phi}{2Q_L}$ 的规律,其中, Q_L 为腔体加载品质因数,取

1 100。进行泰勒展开, $\Delta f = \frac{\Delta\phi}{2Q} f_0 \approx 571\Delta\phi$ (舍去二次项以上残余项),其中角度的单位是“°”,频率单位是 Hz。如果失谐量差得较多,且加速器状态改变后,经过一次调节,频率无法完全跟上,需经过多次调整。为增加算法的收敛性,在上述频率调整值的基础上增加校正因子。

3.3 幅值稳定

根据测量的腔压的偏差调整激励电压的大小。调整方法:当腔压值大于设定值的 10%,以较小的步进改变激励电压。为保证调整的安全,对激励电压输出进行限幅处理。

3.4 打火保护

打火检测与保护的逻辑为:当反射功率 $> 0.8 \times \text{入射功率}$ 时,判断为打火。程序判断到打火时,由 PLC

关断信号源，等待 30 ms 后重新启动信号源输出。高频系统配置有打火保护模块，检测到打火后，切除激励电压 100 ms，并输出打火保护信号。PLC 需检测该保护信号，并在规定时间内(1 s)对其进行计数，如出现持续打火(连续 3 次)，自动启动扫频，重新对工作频率进行扫描。由于检测算法中首先检测宏脉冲头部后 60 μ s 开始检测打火，检测到打火高频输出停止 30 ms。重新启动射频脉冲后，监测点可能位于脉冲中部，无法检测到脉冲头部，从而检测算法无法正常判断。为避免该情况的发生，可以将高频停止时间改为 29.2 ms 或将宏脉冲频率设置为 980 Hz，可以保证占空比工作在 80% 以内的正常检测。

3.5 高频自动老练

控制程序设计了高频腔自动老练程序。自动老练分为扫频、同步变更脉宽、降功率等步骤。

扫描跟工作频率扫描类似。同步变更脉宽：保持占空比与重复频率的比值(0.1)不变，占空比与重复频率同步变更，每个工作点持续 10 s，如出现失谐情况，启动失谐调整。

降功率：降低激励电压，从 10 kW 的腔压对应的激励电压开始降低，步长 0.02 V，降至腔压 5 kW 左右，每个工作点持续 10 s。若出现失谐情况，启动失谐调整。

4 联锁保护

联锁是指机器操作许可和禁止的约束条件^[13-15]。具体地说，就是某种操作或状态完成之前，不允许有别的操作和状态进入，是保证加速器正常运行和人员及机器安全的重要手段，联锁保护动作与加速器工作模式和故障危险程度密切相关。根据试验运行和调试要求，加速器工作模式分为正常运行和调试模式两大类^[16]。其中，正常运行模式根据不同的运行进程配置相应的联锁保护，而调试模式以保证分系统及分系统的组合运行为依据。各子系统运行条件及相互间依赖关系如表 1 所示。

表 1 子系统的运行条件

Table1 Operating conditions of subsystems

name of the subsystem	operating conditions	running normally	relationship with other subsystems
cooling water	water cooling machine in open state	The circulating pump is started and the flow switches are connected.	starting conditions of magnet power supply, high frequency system, ion source power supply and target system
vacuum system	mechanical pump open, vacuum pressure less than 10 Pa, meet the starting conditions of molecular pump	vacuum pressure less than 10^{-3} Pa	starting conditions of magnet power supply, high frequency system, ion source power supply
target system	selection of targeting pharmaceutical mode in operating interface	after the injection and holding of the target, the helium pressure is greater than 0.06 MPa and the target pressure is greater than 0.24 MPa	starting conditions of accelerator beam outflow
magnet power supply	normal vacuum, flow switches of magnet power supply cooling water, magnet upper and lower cooling water are connected	current output reaches set value	starting conditions of high frequency system, ion source power supply
high frequency system	normal vacuum, flow switches of high frequency cooling water is connected, magnet power supply current greater than 150 A	amplitude and phase control is normal	starting conditions of ion source power supply
ion source system	magnet power supply and high frequency are normal; hydrogen flow is normal; access control and shield closure	current output reaches set value	all subsystems are in normal state

正常工作模式不同的运行进程：冷待机模式，仅真空系统运行，解除真空系统与其他系统的联锁关系。热待机模式：真空、水冷、磁铁等系统正常，高频系统仅运行在较低占空比状态，磁铁、高频与真空、水冷的联锁关系保留，解除离子源、门禁等联锁保护。

内靶带束模式：离子源、门禁等联锁保护工作，解除靶系统的联锁保护。

同位素生产：所有联锁保护均起作用。

根据故障不同的危险程度，采取的保护策略如表 2 所示：

表 2 故障分类及保护

Table2 Fault classification and protection

fault classification	fault	protective action
serious fault	target pressure below the lower limit (2 MPa) in target shooting	in emergency, shutdown of all systems(vacuum system, magnet power supply, high frequency system, ion source system)
	vacuum is greater than 1 Pa in target shooting	in emergency, shutdown of all systems(vacuum system, magnet power supply, high frequency system, ion source system)
general fault	helium circulating pressure below the lower limit	turn off the ion source power and stop the beam
	the deviation of recirculating water return flow and outflow is greater than the lower limit value	turn off the ion source power, high frequency system, magnet power supply
	high frequency cavity continuous fire	start scanning at working frequency

5 结论

设计的医用回旋加速器控制系统的子系统由 RX3i 可编程控制器统一管理,基本实现了系统的集成;所采用的高频系统中,利用 PLC 完成工作频率扫描,实现了相位稳定、幅度稳定、打火保护等,从而完成了低电平控制功能;由于子系统相互联系、互相牵制的复杂性,以及出现的故障危险程度的差异,分别从软件、硬件方面对系统进行了相应的联锁保护,保证了加速器的正常运行和人员安全;总体上,满足了加速器运行及其调试要求。然而,其距离商业运行还有一定差距,所以集成性还可以进一步提高;为了使得其相位、幅度范围更小,更加稳定,稳幅稳相算法还可进一步改进。

参考文献:

- [1] GAMBHIR S S,CZERNIN J,SCHWIMMER J,et al. A tabulated summary of the FDG PET literature[J]. Journal of Nuclear Medicine Official Publication Society of Nuclear Medicine, 2002,43(3):441.
- [2] RESKE S N,KOTZERKE J. FDG-PET for clinical use[J]. European Journal of Nuclear Medicine, 2001,28(11):1707-1723.
- [3] 樊明武. 用于医学诊断和治疗的质子回旋加速器[J]. 中国工程科学, 2000,2(12):9-15. (FAN Mingwu, Medical cyclotron used for diagnostic or therapy[J]. Engineering Science, 2000,2(12): 9-15.)
- [4] 张锦明,田嘉禾. 国内正电子放射性药物发展现状简介[J]. 同位素, 2006,19(4):241. (ZHANG Jinming,TIAN Jiahe. The current state of PET radiopharmaceutical in China[J]. Journal of Isotopes, 2006,19(4):241.)
- [5] 何小中,杨国君,龙继东,等. 紧凑型医用回旋加速器的物理设计[J]. 核技术, 2014,37(1):10201-1-010201-5. (HE Xiaozhong,YANG Guojun,LONG Jidong,et al. Physical design of compact medical cyclotron[J]. Nuclear Technology, 2014, 37(1):10201-1-010201-5.)
- [6] 牛宝良,董亨. 基于 TwinCAT 的数字伺服控制系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):306-310. (NIU Baoliang,DONG Heng. Design of digital servo control system based on TwinCAT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):306-310.)
- [7] 高静. 基于 MCGS 的上位机监控系统设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):299-303. (GAO Jing. Host computer monitor and control system design and realization based on Monitor and Control Generated System. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):299-303.)
- [8] 张祎王,曹磊,侯世刚,等. CYCIAE-100 回旋加速器质子照相束流线控制系统的研制[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(1):156-160. (ZHANG Yiwang,CAO Lei,HOU Shigang,et al. Design and implementation of control system for CYCIAE-100 cyclotron beam line of proton radiography[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018,52(1):156-160.)
- [9] KONDO Y,MORISHITA T,HASEGAWA K,et al. High-power test and thermal characteristics of a new radio-frequency quadrupole cavity for the Japan proton accelerator research complex linac[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2013,16(4):040102(1)-2040102(8).
- [10] WANG J,HUANG J L,HE Y. Multi-physics analysis of the RFQ for injector scheme II of C-ADS driver Linac[J]. Chinese Physics C, 2014,38(10):107005(1)-107005(5).
- [11] XIA W L,WANG Z,LU Y R,et al. Design and implementation of a compact control system for coupled RFQ-SFRFQ Linac[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014,61(4):2345-2350.
- [12] 吕俊材,鲍景富. 基于新颖调谐谐振器的低相噪 VCO 设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):290-293. (LYU Juncai,BAO Jingfu. Design a low phase noise VCO based on a novel tunable resonator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):290-293.)
- [13] 朱周侠,龚培荣. 上海光源 Canted 光束线安全联锁系统设计[J]. 核技术, 2014,37(9):7-10. (ZHU Zhouxia,GONG Peirong. Design of the Canted beamline interlock system at SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014,37(9):7-10.)
- [14] 赵潇,丰树强,张国光. 中子厅安全联锁系统设计[J]. 机电工程技术, 2017,46(11):49-52. (ZHAO Xiao,FENG Shuqiang, ZHANG Guoguang. Neutrons hall safety chain system design[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(11):49-52.)
- [15] 张健,郭斐,孙浩章,等. 用于回旋管测试台的高压电源及控制系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2017,29(5):79-85. (ZHANG Jian,GUO Fei,SUN Haozhang,et al. Design of high voltage power supply and control system for gyrotron test bench[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017,29(5):79-85.)
- [16] 于春蕾,赵欢,丁建国. 上海软 X 射线自由电子激光装置联锁保护系统[J]. 原子能科学技术, 2018,52(4):756-761. (YU Chunlei,ZHAO Huan,DING Jianguo. Interlock system for soft X-ray free-electron laser in Shanghai[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018,52(4):756-761.)