

加速器驱动次临界系统注入器Ⅱ 低温恒温器控制系统

姜子运^{1,2}, 牛小飞¹, 张鹏¹, 万玉琴¹, 白峰^{1,2}, 郭晓虹¹, 张军辉¹, 何源^{1,*}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:根据加速器驱动次临界系统(ADS)注入器Ⅱ对低温设备的要求设计了一套 EPICS 架构的控制系统, 实现了低温恒温器系统的远程监控功能。该系统的主要控制设备为 PLC 和串口服务器, 相应的控制程序在 LabVIEW 中开发完成, 并使用 DSC 模块将被控设备的状态和参数等信息以过程变量的形式发布到控制网络中, 实现了 EPICS 接入。使用 PID 算法将低温恒温器的氦槽压力控制在目标值的 ± 100 Pa 内变化, 保证了超导腔的正常工作要求。设计的控制系统运行稳定, 在 5 MeV 的束流实验中发挥了作用。

关键词:加速器驱动次临界系统; 低温恒温器; 控制系统; EPICS; LabVIEW

中图分类号: TP311

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)07-1314-06

doi: 10. 7538/yzk. 2016. 50. 07. 1314

Cryomodule Control System of Injector Ⅱ for Accelerator Driven Sub-critical System

JIANG Zi-yun^{1,2}, NIU Xiao-fei¹, ZHANG Peng¹, WAN Yu-qin¹, BAI Feng^{1,2},
GUO Xiao-hong¹, ZHANG Jun-hui¹, HE Yuan^{1,*}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The cryomodule is an important subsystem of the injector Ⅱ for accelerator driven sub-critical system (ADS), whose performance will determine the quality of the superconducting section. A remote control system based on EPICS was introduced to serve the cryomodule and validate its performance. PLC and serial port servers were chosen to implement the control functions. The supervisory control procedure was programmed with LabVIEW, and the communication with EPICS was implemented by using DSC module. The pressure fluctuation can be controlled within ± 100 Pa through the PID algorithm. The control system can fulfill the design requirement, and contribute to the 5 MeV beam commission.

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2015-09-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助(Y102110ADS)

作者简介: 姜子运(1981—), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 从事加速器控制研究

* 通信作者: 何源, E-mail: hey@impcas.ac.cn

Key words: accelerator driven sub-critical system; cryomodule; control system; EPICS; LabVIEW

加速器驱动次临界系统(ADS)是国际上公认的核废料处理的有效手段,世界上各核能科技发达国家均制定了 ADS 中长期发展路线图^[1],我国也于 2011 年正式实施了未来先进核裂变能的战略性先导科技专项,其中强流质子直线加速器项目的注入器Ⅱ部分由中国科学院近代物理研究所承担。ADS 注入器Ⅱ主要由电子回旋共振型(ECR)离子源、射频四极场(RFQ)加速器、超导加速段以及相应的束流传输线组成^[2]。为了保证超导设备的正常运行,中国科学院近代物理研究所已建成了使用 850 W@4.5 K 的低温系统,并设计了用于维持各超导设备在低温环境下可靠工作的低温恒温器以及控制相关低温气体/液体流向的低温阀箱。

EPICS 在大型加速器和实验控制系统的应用中表现出了优异的性能,并被国内外众多加速器装置广泛采用^[3-6],因此,ADS 注入器Ⅱ项目控制系统也基于 EPICS 架构实现^[7-8]。本文在分析超导设备需求的基础上基于 EPICS 架构设计低温恒温器及低温阀箱控制系统,阐述硬件平台搭建、软件程序设计及恒温器氦压控制的情况。

1 需求分析

为实现注入器Ⅱ的 5 MeV 束流目标,中国科学院近代物理研究所已完成了第 1 个超导加速单元的现场安装、调试工作。该超导加速单元由 6 组用于质子加速的低 β 值半波长谐振式(HWR)超导腔组成,每个 HWR 超导腔前配套使用 1 个超导螺线管及 3 组电流引线部件,此外,还包括必要的束流探测及传感器元件。其中,超导腔和超导螺线管工作在 4.5 K 低温环境下,电流引线的工作环境温度为 4.5 K 至常温。因此,为保证超导腔及其他设备正常工作的低温环境,满足系统漏热及电磁屏蔽需求,超导加速单元安装在低温恒温器 HCM6 中。HCM6 的设计工作温度为 4.5 K,其工作低温介质为液氮,同时为降低液氮的消耗量将液氮作为预冷介质使用。

HCM6 控制系统的任务是使其按照预先设计的低温流程运行,以备超导设备的工作需要,且在设备故障(如超导腔失超等)时提供必要的保护措施。控制系统需实时地监控系统内部各关键点的压力、温度、液位等信号,以了解恒温器及其内部各超导设备的工作环境。同时,需通过控制低温分配阀箱内相应阀门的开度以调节送往恒温器的液氮、液氮量,并将恒温器内返回的低温氦气导入制冷机组或低压路,以实现氦气的循环利用,控制内容包括流体通断控制、压力控制等,满足超导设备对低温工况的需求。此外,在系统出现故障能及时地采取相应措施,避免事故扩大并确保工作人员和设备的安全。

特别地,ADS 注入器Ⅱ使用的 HWR 超导腔的设计谐振频率为 162.5 MHz,且其谐振频率极易受冷却介质压力的影响,这就要求 HCM6 内氦槽压力应尽可能地稳定,要求正常工作时压力波动幅度不能超过 ± 150 Pa^[9]。

2 系统硬件设计

ADS 注入器Ⅱ低温恒温器控制系统需监控的现场设备主要包括 Model 218 型温度显示器、CENTER TWO 型真空计、气动调节阀、压力变送器等,其被控设备的数量及接口类型列于表 1。

表 1 系统设备及接口

Table 1 Device and interface of system

设备名称	接口类型	数量
调节阀	4~20 mA	15
压力传感器	4~20 mA	7
氦压计	0~10 V	1
液位计	0~10 V	2
温度显示器	RS232	7
真空计	RS232	2

由表 1 可知,本系统中相关的被控设备的控制接口类型不统一,既有模拟接线控制方式,也有数字通信控制方式,且对于同样的数字通

信硬件接口,不同被控设备的波特率、数据长度及校验码等基本通信参数也不尽相同,具体的通信指令更不同。因此,使用串口服务器处理 RS232 串口通讯信号,并通过 TCP 网络连接 to 控制系统中。控制系统的硬件连接如图 1 所示。

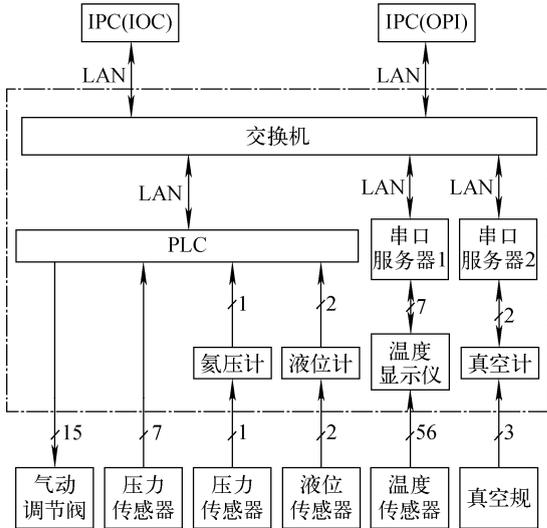


图 1 硬件连接示意图

Fig. 1 Scheme of device interconnection

由图 1 可知,控制系统以 TCP/IP 网络为基础组建而成,实现了从设备层、控制层到管理层的无缝信息集成。系统中主要使用的设备包括串口服务器和 PLC,串口服务器为研华股份有限公司的 EKI1528,该串口服务器可实现至多 8 路 RS232/RS485/RS422 串口信号与工业以太网信号的双向转换,且每一端口的通信参数均可根据连接设备的需要独立配置,从而有效地简化了控制系统的硬件结构;PLC 系统则基于菲尼克斯公司的 IL170 平台搭建而成,该型号 CPU 具有性能价格比高、扩展性强、组网简单等优点,配合输入输出模块可构成相对独立的控制单元。

3 系统软件设计

3.1 软件架构

HCM6 控制系统的软件基于分布式 EPICS 架构实现,EPICS 是大型实验物理和加速器控制系统组态软件工具,由 3 部分组成:运行在客户端的 OPI、运行在服务器端的 IOC 和通道访问 CA,它们以客户机/服务器模式工作在网络

环境中。EPICS 控制系统的结构如图 2 所示。

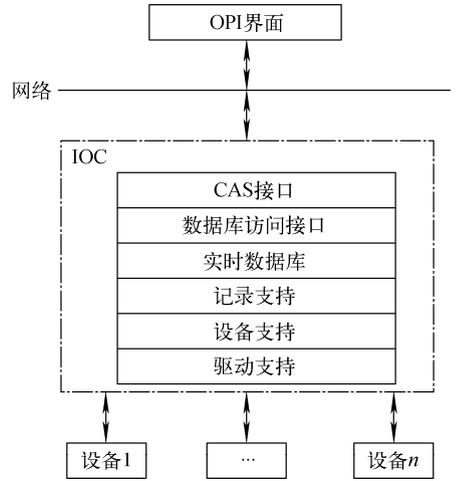


图 2 EPICS 控制系统结构

Fig. 2 Architecture of EPICS control system

3.2 IOC 程序

鉴于 LabVIEW 为仪器编程和数据采集提供了便捷的途径,在测试测量、工业自动化及加速器控制等方面均得到了大量的应用^[10-11],其具有编程简单、运行可靠的优点,本系统的 IOC 程序也基于 LabVIEW 开发而成。系统 IOC 程序对每个被控设备进行独立的模块化编程,实现与被控对象之间的数据交换及相关控制功能,达到对现场设备控制的目的。最后,通过 NI 公司的 DSC 模块建立 IOC sever,将所有被控设备监控的参数以过程变量的形式进行网络发布,实现 EPICS 接入。

IOC 程序的基本功能之一是通过 TCP/IP 协议实现与现场被控对象之间的数据交互,但由于现场环境的复杂性,在实际使用过程中很可能会遇到被控设备故障、控制设备故障等需复位处理及其他可能影响通信功能正常使用情况。因此,要求设计的程序有较好的容错性能,在设备故障或通信异常时可及时地发出报警信号提醒相关人员处理,同时能自动地对故障设备巡检,待设备恢复正常后能自动重新连接,并清除故障信号。典型的监控程序流程如图 3 所示。

3.3 基于 PLC 的腔压控制

低温恒温器内部氨槽空间有限,因此其压力值较为敏感,不仅与正常工作的超导腔及超

导磁体施加的功率有关,而且受注液速度、液位高度等因素的影响;当工作条件发生突变时压力会发生很大变化,瞬间压力变化量可达 4 000 Pa 左右。其闭环控制基于 PLC 完成,根据设定值和当前从探测器反馈的实际值可由 PID 算法计算得到气动调节阀的开度值,最终实现 HCM6 压力稳定的目的。压力闭环控制原理如图 4 所示。

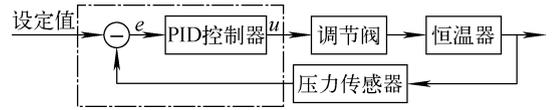


图 4 压力闭环控制原理

Fig. 4 Control principle of pressure feedback

图 4 中压力的设定值在 OPI 界面中设定, PID 控制器的输入值 e 即为设定值减去系统反馈的实际运行值,由 PLC 完成增量式数字 PID 控制算法,其输出 $u(k)$ 与 $e(k)$ 的关系如式 (1)^[12] 所示:

$$u(k) = k_p[e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] + u(k-1) \quad (1)$$

HCM6 压力控制情况及相应阀门开度的实际运行结果如图 5 所示。图 5 中实线为 HCM6 压力实际工作曲线;点划线为 CM632 阀门开度,表示低温恒温器至低压路的回气调节量;虚线为 CM633 开度,表示低温恒温器至制冷机的回气调节阀。这两个阀门需根据低温系统的实际运行情况进行手动切换,正常工作时,为降低系统冷量损失, HCM6 中小于 80 K 的低温氦气回收到制冷机回路中,此时 CM632 阀门将处于关闭状态。由图 5 可知,正常工作时低温恒温器内的压力可控制在目标压力 (110 000 Pa) 的 ± 100 Pa 以内波动,在故障状态下,瞬时压力变化较大,但被控阀门可及时响应,在较短时间内将腔体压力重新控制至目标值。

4 应用及调试

本文设计的低温恒温器控制系统 OPI 程序基于 CSS 软件开发,实现了系统内所有被控

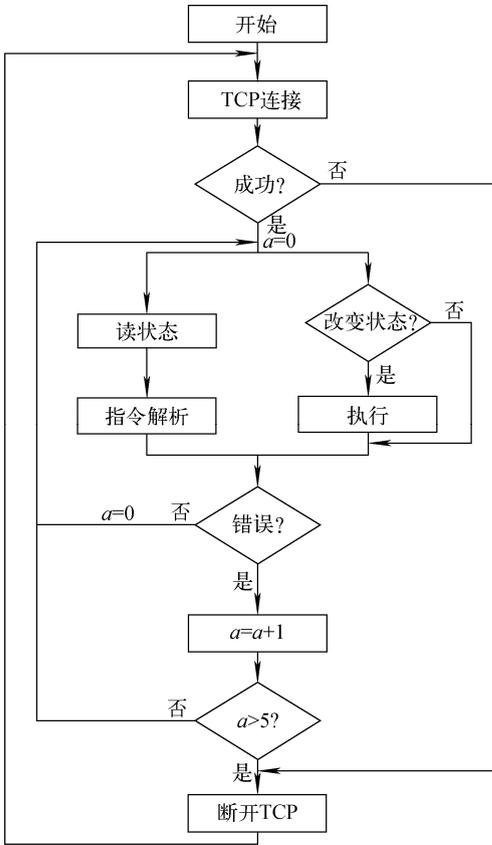


图 3 监控程序流程

Fig. 3 Diagram of supervisory control software

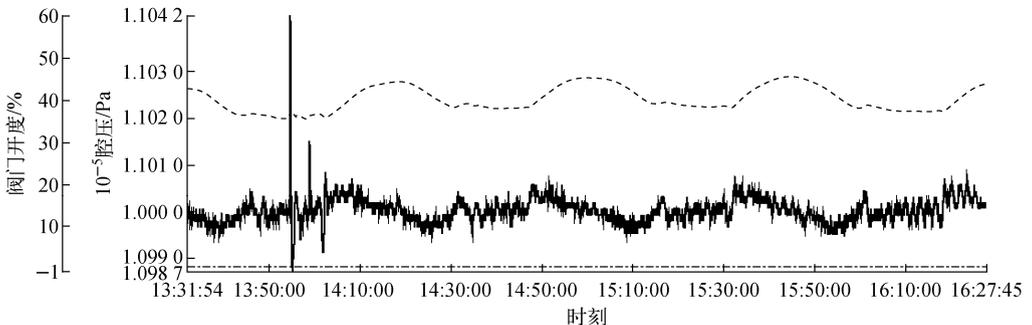


图 5 阀门开度与腔压对比

Fig. 5 Comparison of valve opening ratio and HCM6 pressure

设备及关键参数的远程监控功能,在方便相关人员的调试、设备维护和故障排查的同时,极大地降低了操作人员的维护工作量。目前,控制

系统已完成现场安装及测试工作,并投入常规运行。低温恒温器 HCM6 控制系统的监控主界面如图 6 所示。

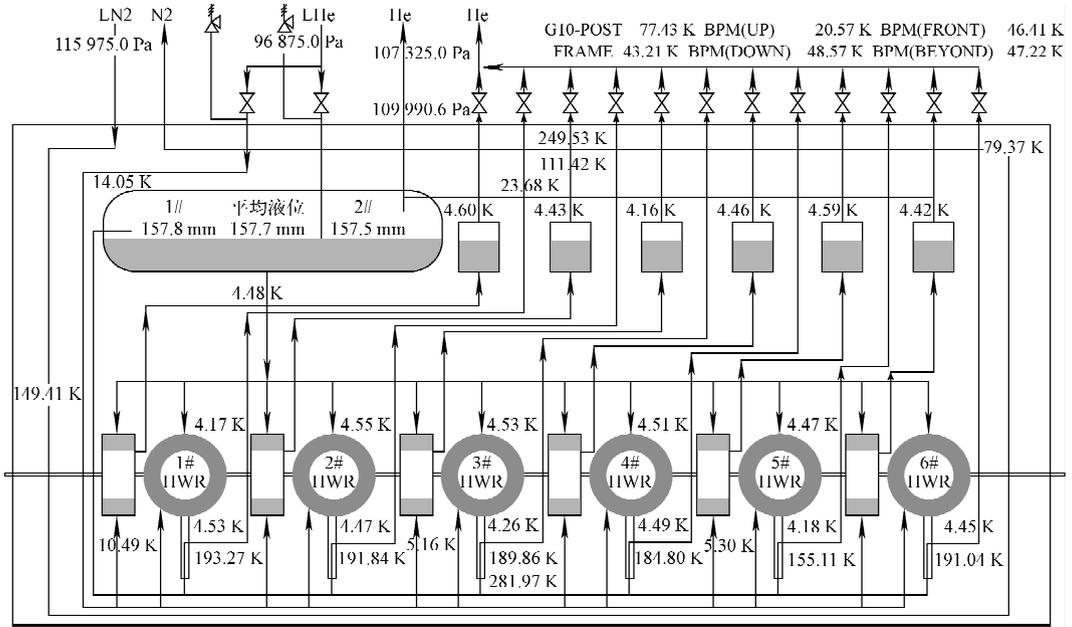


图 6 低温恒温器 HCM6 控制系统监控界面

Fig. 6 Control interface of HCM6 control system

5 结论

本文设计的 ADS 注入器 II 低温恒温器控制系统实现了对系统内所有被控设备的远程信号采集、监控功能,满足系统的控制要求,正常工作时低温恒温器内部的氦压可控制在目标值的 ± 100 Pa 范围内变化,优于预期的控制目标。基于 EPICS 架构的控制程序简化了系统的软件编写工作,节约了调试时间,有利于提高系统的稳定性和可维护性。目前,低温恒温器控制系统已完成安装调试工作,在 ADS 注入器 II 实现 5 MeV 束流能量的物理实验中发挥了重要作用。

参考文献:

[1] 詹文龙,徐珊珊. 未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统[J]. 中国科学院院刊,2012,27(3):375-381.
ZHAN Wenlong, XU Hushan. Advanced fission energy program—ADS transmutation system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 375-381(in Chinese).

[2] WANG Zhijun, HE Yuan, LIU Yong, et al. The design simulation of the superconducting section in the ADS injector II [J]. Chinese Physics C, 2012, 36(3): 256-260.
[3] 李刚,岳珂娟,王克祥,等. 北京正负电子对撞机低温超导设备控制系统研制[J]. 原子能科学技术,2008,42(4):366-369.
LI Gang, YUE Kejuan, WANG Kexiang, et al. Control system of cryogenic and superconductive devices at BEPC II [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(4): 366-369(in Chinese).
[4] 张德敏,金晓,黎明,等. EPICS 在加速器控制系统中的应用[J]. 强激光与粒子束,2008,20(4):597-600.
ZHANG Demin, JIN Xiao, LI Ming, et al. Application of EPICS to accelerator control system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 597-600(in Chinese).
[5] 丁建国,赵欢,朱海军,等. 上海同步辐射装置电源控制系统[J]. 核技术,2012,35(8):573-577.
DING Jianguo, ZHAO Huan, ZHU Haijun, et al. The SSRF power supply control system[J].

- Nuclear Techniques, 2012, 35(8): 573-577 (in Chinese).
- [6] ZHANG Yong, XIAO Bingjia, YUAN Qiping, et al. The design of the plasma control system in KTX[J]. Plasma Science & Technology, 2015, 17(4): 340-346.
- [7] 于春蕾,郭玉辉,何源,等. 基于冗余技术的强流质子 RFQ 控制系统设计[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(4): 740-745.
- YU Chunlei, GUO Yuhui, HE Yuan, et al. Design of control system for high intensity proton RFQ based on redundancy technology[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(4): 740-745(in Chinese).
- [8] 郭玉辉,于春蕾,徐卫彬,等. ADS 注入器Ⅱ控制系统软件平台设计[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(增刊): 704-707.
- GUO Yuhui, YU Chunlei, XU Weibin, et al. Design of software platform for injector Ⅱ control system in ADS[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(Suppl.): 704-707(in Chinese).
- [9] PEKELER M, DUNKEL K, HENNEBOM R, et al. Design of a superconducting half wave resonator module for proton/deuteron acceleration [C]// Proceedings of the 11th Workshop on RF Superconductivity. Lübeck/Travemünder; DESY, 2009: 124-127.
- [10] 李刚,赵籍九. LabVIEW-EPICS 在 BEPCⅡ温度监测系统中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(2): 222-225.
- LI Gang, ZHAO Jijiu. Application of LabVIEW-EPICS in measuring and monitoring system of BEPCⅡ [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(2): 222-225(in Chinese).
- [11] 邹杨,顾颂琦,姜政,等. 基于 LabVIEW 的 XAFS 光束线实验站数据采集系统[J]. 核技术, 2009, 32(4): 246-250.
- ZOU Yang, GU Songqi, JIANG Zheng, et al. A LabVIEW-based data acquisition system for the XAFS experimental station at SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2009, 32(4): 246-250(in Chinese).
- [12] 宣科,王琳,刘功发,等. 基于 PID 控制的加速器束流闭轨反馈[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(8): 1 427-1 429.
- XUAN Ke, WANG Lin, LIU Gongfa, et al. Beam closed orbit feedback based on PID control [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(8): 1 427-1 429(in Chinese).