

文章编号: 1007-4627(2015)03-0305-05

ADS注入器 II 低温恒温器控制系统

罗冰峰^{1,2}, 郭玉辉¹, 徐卫彬^{1,2}, 刘海涛¹

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

摘要: 设计了用于 ADS 注入器 II 超导腔的低温恒温器控制系统。采用了基于 EPICS 的分布式控制系统架构, 以 PLC 和串口服务器等为核心控制硬件, 用 PID 算法实现了恒温器内氦压和液氦量的自动控制, 压力控制精度约为 ± 100 Pa, 液氦高度误差约 ± 10 mm。利用 EPICS 和 LabVIEW 在局域网发布过程数据, 实现了操作员界面对低温恒温器分布式系统的统一管理, 控制系统设计性能满足使用需求, 已经在 ADS 注入器 II 超导高频腔水平测试中发挥了重要作用。

关键词: 加速器驱动次临界系统; 低温模块; 控制系统; 实验物理及工业控制系统; PID
中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.305

1 引言

加速器驱动次临界系统 (ADS) 既可以用于降低核废料的放射性危害, 实现核废料的 (最少化) 安全处理, 同时也可用于次临界反应堆的运行输出核能, 因此世界上各个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“ADS 嬗变系统”的战略性先导科技专项, 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研制。

物理研究人员为 ADS 注入器 II 研制了用于质子加速的 $\beta = 0.09$ 的 162.5 MHz HWR 超导高频腔, 低温恒温器主要用于提供超导腔和聚焦螺线管^[2]低温运行容器。为了使铌材质的 HWR 超导腔获得预期的超导电流, 需要为其提供低于超导临界温度并且状态稳定的低温环境, 以避免超导腔整体或者局部失超; 同时也需要为聚焦螺线管提供一定的低温环境。HWR 超导腔设计谐振频率为 162.5 MHz, 有效工作带宽约 200 Hz, 其谐振频率极易受冷却介质的压力影响, 压力每变化 100 Pa, 腔体谐振频率变化约 40 Hz, 这就要求冷却介质的压力必须控制在一个稳定的范围, 腔体研究人员希望其摆动幅度不超过 150 Pa, 以免超导腔谐振频率变化过大而无法捕捉并锁定工作点。

目前已经为低 β HWR 超导高频腔的测试工作设计了一套 TCM (Testing CryModule) 低温恒温器控制系统, TCM 设计制冷温度为 4 K, TCM 的功能主要是完

成腔体水平测试, HWR 超导腔水平测试系统图如图 1 所示。

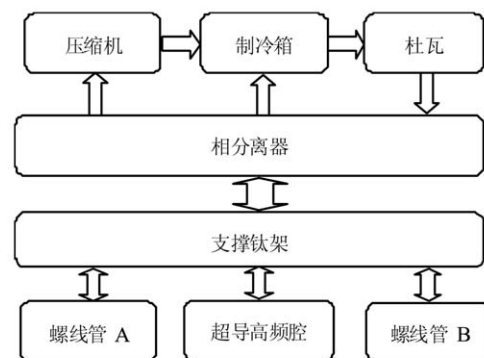


图 1 HWR 超导腔水平测试系统图

系统是实现调压降温的同时, 要实现氦气的循环利用, 相分离器由杜瓦提供液氦, 并根据温度情况向压缩机或制冷机输送回氦气, 由此完成氦气循环使用。冷箱相分离器内的液位和压力的控制是循环降温的重要环节。本文在分析低温环境控制需求的基础上介绍基于 EPICS 架构的 TCM 控制系统, 重点阐述相分离器内液氦高度和氦压控制, 包括硬件设计、软件设计和现场调试情况。

2 控制系统结构

低温系统被控设备地理位置十分扩散, 将各种控制

收稿日期: 2014-09-10; 修改日期: 2014-10-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA03021503)

作者简介: 罗冰峰(1988-), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 从事加速器控制技术研究; E-mail: luobingfeng@impcas.ac.cn

通信作者: 郭玉辉, E-mail: guoyuhui@impcas.ac.cn

参数全集中到中央控制室将增加系统成本，同时现场调试操作也不方便。分布式系统可以很好地解决这个问题，即每个独立的子系统各由一台计算机控制，信息处理和人机界面也备有相应的计算机，通过网络将系统中各计算机相互连接。非商业化的 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System) 采用了标准模型的分布式控制系统，具有可移植性、可互操作性、可裁剪性以及可重用性的特点。同时系统结构灵活、开放性好、可扩展性好、国际交流协作方便，大量开发工具都是免费下载并有详细的技术文档支持，因此现已逐渐成为加速器、天文探测及大型实验物理等大科学装置的主流控制系统软件。

ADS 注入器 II 直线加速器控制系统也将基于 EPICS 实现。作为其重要的子系统之一，低温系统的控制采取与 ADS 直线加速器控制系统一致的控制软件和控制模式。基于标准的分布式 EPICS 结构，其软件开发主要包括两部分：IOC 层和 OPI 层，分别作为访问 CA 服务器端和客户端的通道。EPICS 控制系统结构如图 2 所示。

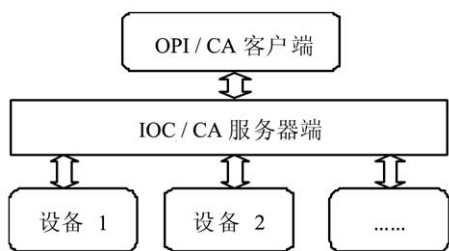


图 2 EPICS 控制系统结构图

在图 2 中，CA 服务协议通过局域网分别连接 CA

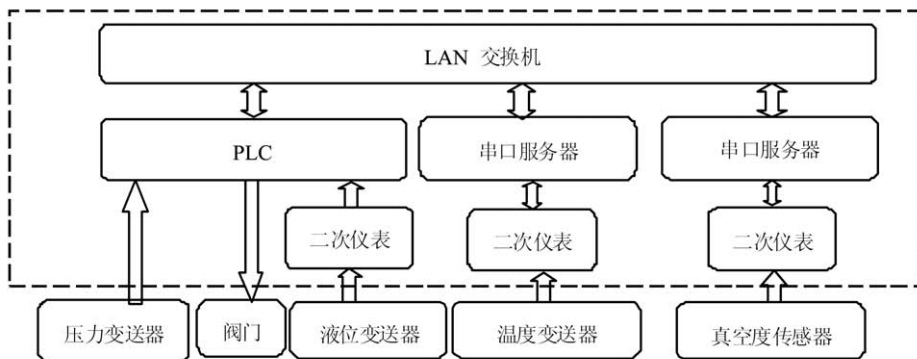


图 3 TCM 硬件连接示意图

图 3 中虚线框内是控制系统现场主要硬件，系统以工业以太网交换机为中心组建而成。PLC 控制器基于

客户端和现场设备，同时完成设备端和客户端交互。网络连接使得硬件系统现场布置变得十分灵活，下一节将详细讨论 TCM 硬件系统结构。

3 硬件系统设计

为保证整个 TCM 安全可靠运行，需要设计一套专用的分布式网络控制系统，包括现场控制硬件、EPICS 运行环境、通信链路、以及人机交互界面等。

现场传感器用于实时读取各个关键点的压力、温度、真空度等数据，实时反映系统状态；现场执行器包括阀门等设备，作为系统的输出环节，实时调整系统状态，使其按预先设计的流程运行；保护环节在系统发生故障时能及时采取措施，保护系统设备和人员安全。因此系统的输入输出设备接口类型很多：有输入也有输出，既有模拟信号又有数字信号，有强电设备也有弱电设备。TCM 用到的主要被控接口如表 1 所列。

表 1 TCM 控制设备接口

设备名称	信号类型	设备名称	信号类型
压力变送器	4~20 mA DC	气动调节阀	4~20 mA DC
液位变送器	4~20 mA DC	插板阀	220 V AC
温度变送器	RS232	真空度仪表	RS232
阀门状态变送器	24 V DC		

根据现场仪表设备接口特点和分布情况，温度监测和真空度仪表通过 RS232 接口与串口服务器连接，串口服务器可以把多通道的温度和真空度数据很方便地传送到以太网；液位及压力仪表则和控制阀门一起连接至 PLC，实现模拟量的采集和转换以及阀门的控制。设计 TCM 硬件系统连接如图 3 所示。

菲尼克斯 AXC1050 平台，该平台适合中小型控制系统任务，支持众多工业现场总线协议，可与多种第三方设

备无缝集成。本系统中扩展了 PLC 的数字 IO 模块、电流 IO 模块。串口服务器选用研华公司的 EKI1528, 该设备最多可实现 8 路串口接入, 并可根据需要把串口配置成 RS232、RS485、RS422 接口, 有效地简化了系统结构。EPICS 和 LabVIEW 软件运行平台则是选用的研华公司的工控机 (IPC), 工控机是 EPICS 的 IOC 服务器运行平台, 平台实现与 OPI 数据的交换和设备的数据交换, 是整个系统的数据交互核心。

4 软件设计

4.1 PLC 程序

应用菲尼克斯公司的 PC WORKS 软件环境完成对 PLC 的组态, 采用结构化编程语言完成 PLC 程序设计。PLC 现场 IO 模块的功能有传感器模拟信号接收和转换、阀门的模拟信号控制、PID 自动控制、插板阀信号处理以及网络数据收发等。

所选菲尼克斯模拟 IO 模块有 0 至 30 000 的转换幅度, 可以充分利用传感器的变送精度, 实现被控执行器件的高精度控制。

为了给超导腔及束流螺线管提供合适的低温环境, 以及为超导腔提供合适的压力环境, 我们采用 PID 自动控制算法来实现压力和液位的自动控制, 同时保留手动控制模式以供物理人员调试使用。PC WORKS 软件平台提供了完整的 PID 模块 F-PID, 设定调试好参数即可使用。用软件自带封装好的 PID 成熟算法就可实现液位和压力的自动调节, 可以较好地实现液位和压力的独立控制。

实测中发现注入氦液的动作会引起相分离器内压力的快速增加, 迅速导致压力不稳定, 从而引起超导腔频率的明显变化。为了解决这个问题, 在注液过程测试中找到了注液与相分离器压力增加的规律, 并以此改进了压力控制的 PID 控制方法, 即动态 PID 参数调整法: 在没有注液时使用一组固定 PID 参数控制压力, 而在注液动作发生时使用修正的 PID 参数, 修正参数的方法是依据注液阀的打开程度, 按比例放大压力 PID 控制的比例系数值。应用此方法可以缓冲由于注液而引起的液氦压力冲击波动, 有效地改善了恒温器液氦压力的调节稳定性。

由于相分离器内的氦处于气液两态临界温度, 状态极不稳定, 导致采样数据波动较大, 因此对压力和液位的采样数据进行了移动平滑处理, 以更客观地反映实际物理值; 同时自动控制输出环节加入了阀门开度控制数据的平滑过渡, 即采用增量增加或递减的方法调节阀门, 这个方法可防止阀门的瞬间大开大合和频繁抖动,

因此显著改善了阀门的控制稳定度, 也有助于降低阀门的磨损速度。PID 自动控制部分程序流程如图 4 所示。

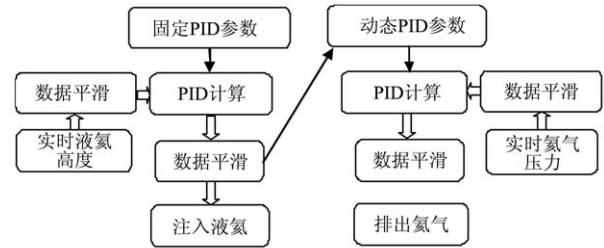


图 4 PID 自动控制部分程序流程图

4.2 IOC 程序

Labview 是一种图形化的编程软件, 其优势在于易上手且功能强大, 同时支持多种总线接口。而 Epics 软件的使用, 其主要工作在于前端 IOC 的驱动开发, 对于一些常用的设备驱动, Epics 系统均有完整的 IOC 驱动可供下载。但对一些新的特殊的设备驱动, 就需要自己去开发。由于低温控制系统被控设备繁杂, 调试任务重, 控制系统的重点在于氦压和液位的双环路 PID 闭环控制的参数调整和优化。因此, 对低温中的真空计、分子泵等设备信号读取, 采用 Labview 编程实现, 而对于最核心的泵阀连锁保护和参数调整, 我们采用 Epics IOC+PLC 编程去实现。

串口服务器数据使用 Labview 平台从局域网读取, 实时显示并存储指定的数据, 同时通过 Labview 程序的 DSC 模块发布成 Epics CA 协议可读写的过程变量到局域网, 如图 5 所示。

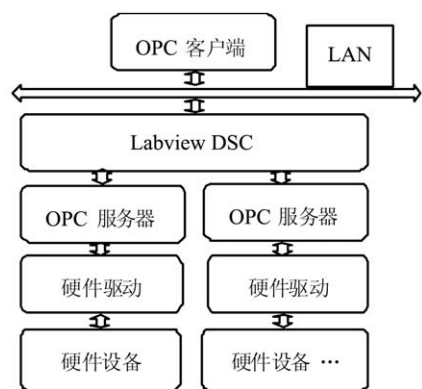


图 5 DSC 过程变量发布示意图

OPC(OLE for Process Control) 作为一种工业标准, 提供了硬件设备的统一“驱动”, 极大地简化了软件与硬件之间的通讯编程。DSC(Data logging and Supervisory Control) 能轻松地与 OPC Server 通讯, 也能生成自己的 OPC Server。本系统中使用了 LabVIEW

建立自己的 OPC server, 首先通过 Labview 来与硬件设备的驱动直接进行通讯, 即读取串口服务器各个监测数据, 然后将读取的数据放在 OPC Server 中作为一个 OPC 标签发布即可。

Epics 通过 TCP/IP 网络数据包和 PLC 交换数据, 同时 Epics IOC server 将数据以 PV 变量的形式发布到局域网。

整个系统的数据交互是由 Epics IOC 和 Labview 程序共同完成。通过将现场各设备的控制数据统一发布到局域网上, 以方便用户界面的编程开发。

4.3 用户界面

为了界面统一, 同时考虑到 Labview 图像界面占用资源大, 以及操作界面安装部署的便利性, 低温系统的控制界面采用 CSS 软件实现, 其简洁直观的图形控件方便了物理研究人员使用。CSS 用户操作界面从局域网获取 Epics IOC 和 Labview 发布的 PV 过程变量, 实现了设备数据的集中显示和管理, 如图 6 所示。

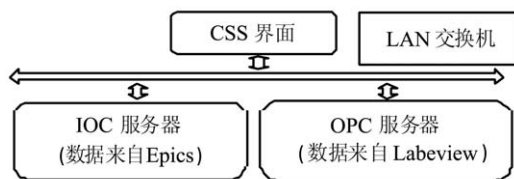


图 6 客户端程序结构

5 调试情况

经现场测试表明, 本系统可远程实现对 TCM 系统的降温和回温控制, 实现低温恒温器内液氦位置及压力的自动控制, 同时实现温度、压力等数据的实时监测和存档。液氦压力的闭环控制经过不断的参数优化和调整, 取得了理想的压力控制目标, 可满足超导腔的低温运行要求。液氦压力连续测试结果如图 7 所示。

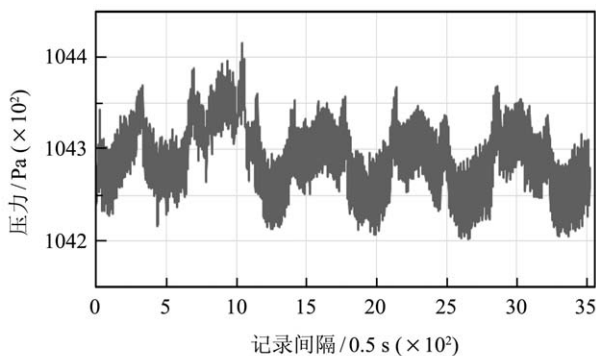


图 7 压力测试图

6 结论与展望

TCM 低温恒温器控制系统的设计有效地实现了现场设备的远程信号采集、监测和控制, 可满足 ADS 注入器 II 超导腔低温运行的使用要求。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, 增加了系统的稳定性和可维护性。Labview 软件平台灵活加入, 实现了串口服务器数据的采集和发布, 使本系统能在较短的时间调试通过。目前低温系统已经协助完成了 ADS 注入器 II 超导腔水平测试。

参考文献:

- [1] ZHAN Wenlong, XU Hushan. Bulletin of Chinese Academic of Sciences, 2012, **27**(3): 375. (in Chinese)
(詹文龙, 徐珊珊. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 375.)
- [2] WAN Yuqin, NIN Xiaofei, HAN Yanning, *et al.* Cryogenics and Superconductivity, 2013, **41**(12): 25. (in Chinese)
(万玉琴, 牛小飞, 韩彦宁, 等. 低温技术, 2013, **41**(12): 25.)
- [3] ZU Donglin, CHEN Jiaer. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1996, **20**(7): 663. (in Chinese)
(祖栋林, 陈佳洱. 高能物理与核物理, 1996, **20**(7): 663.)
- [4] GUO Yuhui, WANG Yanyu. Microcomputer Information, 2006, **22**(10): 112. (in Chinese)
(郭玉辉, 王彦瑜. 微计算机信息, 2006, **22**(10): 112.)
- [5] ZHANG Demin, JIN Xiao, LI Ming, *et al.* High Power Laser And Particle Beams, 2008, **20**(4): 597. (in Chinese)
(张得敏, 金晓, 黎明, 等. 强激光与粒子束, 2008, **20**(4): 597.)
- [6] HE Xuchun, QIAO Weimin, JING Lan, *et al.* Nuclear Physics Review, 2010, **27**(2): 170. (in Chinese)
(何旭春, 乔卫民, 敬岚, 等. 原子核物理评论, 2010, **27**(2): 170.)
- [7] YUE Kejuan, XU Shifu, ZHAO Jijiu. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, **26**(4): 539. (in Chinese)
(岳珂娟, 许士富, 赵籍九. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(4): 539.)
- [8] JIANG Wei, LAI Qinggui, QING Ling, *et al.* High Power Laser And Particle Beams, 2013, **25**(5): 1270. (in Chinese)
(蒋薇, 赖青贵, 秦岭, 等. 强激光与粒子束, 2013, **25**(5): 1270.)
- [9] YIN Jian, CHEN Shaohua, ZHANG Weiguang, *et al.* High Power Laser And Particle Beams, 2010, **22**(2): 357. (in Chinese)
(尹剑, 陈绍华, 张伟光, 等. 强激光与粒子束, 2010, **22**(2): 357.)
- [10] LI Fengyu, ZHANG Dafa, WANG Shaoming, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2008, **42**(S0): 137. (in Chinese)
(李凤宇, 张大发, 王少明, 等. 原子能科学技术, 2008, **42**(S0): 137.)

Control System of C-ADS Injector II Cryomodule

LUO Bingfeng^{1,2}, GUO Yuhui¹, XU Weibin^{1,2}, LIU Haitao¹

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

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

Abstract: Cryogenic module provides important low temperature environment for half wave resonance superconducting cavity in C-ADS injector II, to ensure the effective operation of cryogenic module, a remote control system which is based on the physical and experimental industrial control systems (EPICS) is introduced in this paper. PLC and serial port server are used as field controllers. Host computer runs EPICS and LabVIEW which are capable of getting and releasing data in local area net. Operators manage all the equipments through a CSS interface which is linked to local area net. The control system which is simple structure and reliable work, has played an important role in the level test of HWR superconducting cavity.

Key words: accelerator driven sub-critical system; cryogenic module; control system; experimental and physics industrial control system; PID

Received date: 10 Sep. 2014; **Revised date:** 28 Oct. 2014

Foundation item: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDA03021503)

Corresponding author: GUO Yuhui, E-mail: guoyuhui@impcas.ac.cn.

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