

文章编号: 1007-4627(2010)04-0464-05

兰州重离子加速器团簇内靶装置控制系统设计^{*}

王彦瑜¹, 林飞宇^{1,2}, 张建川^{1,2}, 刘伍丰¹, 肖文君^{1,2}, 邵曹杰¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 介绍了兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的实验环(CSRe)团簇内靶装置控制系统的设计。该内靶系统由多种设备构成, 包括喷嘴测温与加热控制子系统、真空与阀门监测/控制子系统、分子泵监测与控制子系统、数据处理与流程软件子系统等部分。该系统在内靶实验中工作状态良好, 满足了内靶实验的需求。在该控制系统的支持下, 2010年1月第一轮辐射电子俘获物理实验顺利完成。

关键词: CSRe; 内靶; 控制系统

中图分类号: TP311, TP272

文献标识码: A

1 引言

团簇内靶实验装置是兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)实验环(CSRe)上重要的物理实验终端, 它可为 CSRe 内靶物理实验提供厚度为 10^{11} — 10^{13} atoms/cm² 的团簇靶和极化靶。内靶实验具有高亮度、高精度、高灵敏度、方便进行各类符合测量、可产生处于某一特定激发态的离子束等特点^[1], 为探测小几率事件和较重的碰撞产物提供了可能。内靶系统也可产生处于特定激发态的离子束, 为态相关的碰撞研究提供了条件。内靶装置结构复杂, 有数十种不同类型的设备需要监测和控制, 控制系统的优劣直接关系到物理实验的成败。为此, 本研究组为内靶装置自主设计了全部软硬件, 构建了控制系统。在 2010 年 1 月完成的首轮电子俘获实验中, 该控制系统运行稳定, 实现了温度、气压和设备状态的远程监测和控制, 完全满足了实验的要求。

2 控制系统总体介绍

在 HIRFL-CSR 中, 离子束通过高频系统不断加速至高能量^[2](约每秒 10^6 圈), 束流经引出系统从主环(CSRm)引出至 CSRe 内靶系统, 高能离子

束撞击内靶处喷嘴喷出的实验气体靶(团簇冷凝态)后, 发生反应, 来完成各种物理实验^[1]。团簇内靶是一个由各种不同设备组成的复杂系统, 仅需要控制的设备合计就有 6 类 14 种, 共 40 多个节点。这些设备的工作原理、工作方式、监测参数和控制命令等各不相同, 而且, 设备之间有相互关联。因此, 需要根据设备的特点和实际情况分别予以处理。采用基于以太网的多前端处理机分布式技术对这些设备实现了远程监测与控制。底层控制系统硬件需要跟上层的用户管理软件相结合, 完成控制系统的任务。各子系统之间通过底层控制模块的关联和上层软件层的关联, 实现模块之间协调工作, 保证控制系统安全运行的同时不会影响实验环的工作状态。

3 控制系统各子系统的实现

针对不同的被控对象, 自主设计了 3 种用于内靶控制系统的硬件模块, 3 种控制模块的实物照片如图 1 所示。其中, 温度控制模块用来实现喷嘴处温度的恒定调控; 真空和阀门模块用来读取靶室内的真空度并根据命令或者自保护阈值开关阀门; 泵控制模块读取泵的运行参数并根据要求发送相关指令控制泵的运行状态。这 3 种控制模块均采用美国

* 收稿日期: 2010-03-31; 修改日期: 2010-07-27

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10874188)

作者简介: 王彦瑜(1960-), 男(汉族), 陕西绥德人, 研究员, 博士生导师, 从事数据获取与自动控制研究;

E-mail: yanyu@impcas.ac.cn

TI 公司的超低功耗 16-bit 精简指令 (RISC) 混合信号处理器 MSP430F149^[3] 作为其核心处理器。MSP430F149 单片机内部集成了多个模拟模块。例如, 模拟比较器、8 通道 12-bit、200ksps 的 ADC 等。这些特性使得它在测量领域具有较高的竞争力。在已经建成的 CSR 真空控制系统中, 采用 MSP430F149 单片机的控制模块已得到广泛应用。实践证明, 在强辐射、强电磁干扰的恶劣工作环境中, 它可以长时间稳定工作^[4]。

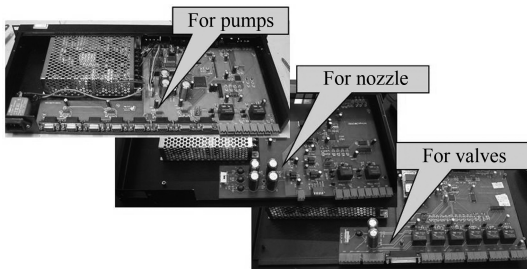


图 1 设计的 3 种控制模块

除此之外, 设计的这 3 种模块均支持 RS232 串口通信和以太网通信, 具备 220 V 独立供电, 标准 1U 高度等特点。部分模块根据需要使用了美国 Xilinx 公司的高性能 CPLD。

下面将主要介绍这 3 种模块中温度监测/控制子系统的设计思路和方法, 然后对其他两种模块进行简要介绍。

3.1 喷嘴测温与加热子系统设计

3.1.1 闭环控制系统原理介绍

CSR_e 团簇内靶的工作原理如下: 纯净气体 (氢气、氖气、氮气、氩气等) 经喷嘴喷射到碰撞点。为了在碰撞点得到尽可能高的靶原子密度, 需要将气体冷却到接近沸点, 但不能低于其沸点以致于凝结, 使气体呈团簇状 (即“雾”状)。喷嘴处温度的控制十分重要, 温度过低则会冻结喷嘴, 实验不能继续; 温度过高则不能形成团簇状, 束流碰撞几率很低, 影响实验效率。设计的内靶温度控制器通过一个可预设温度的闭环自动控制器来控制喷嘴部分的温度, 使喷嘴处温度处于实验所需的最佳温度点, 通过优化设计, 喷嘴处温度误差在 ± 0.5 K。

冷却喷嘴由一台恒定制冷功率 P_1 的液氮制冷机制冷。由于不同的实验气体保持“雾”状所需的温度并不相同, 故还需在制冷的同时对喷嘴部分进行

加热功率为 P_2 的调节。只有当 P_1 和 P_2 达到相对平衡时, 才能使得实验气体保持在“雾”状。在此, 采用了由特殊复合材料制成的单调温度系数的热敏电阻线圈来监测喷嘴处的温度变化; 通过 1 mA 电流源给线圈提供恒定电流, 再通过 AD 采集线圈端电压间接得到喷嘴处的温度值。由此温度值作为调节参考, 来调节与加热线圈连接的安捷伦 (Agilent) 电源 (3634 A, 电压/电程序可调) 输出功率 (也即 P_2), 从而改变加热装置的发热功率, 不断重复此过程形成闭环控制, 以达到 P_1 和 P_2 的动态平衡, 从而保证实验气体所需的“雾”状。1 mA 电流源也可产生热量, 但相比 P_2 可以忽略不计。内靶温度闭环系统框图见图 2。

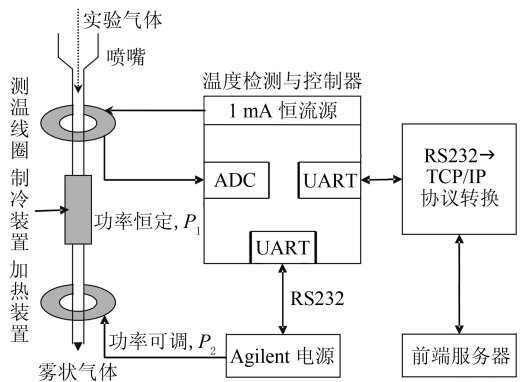


图 2 内靶温度闭环系统框图

3.1.2 控制器硬件设计

温度控制器是内靶控制系统关键部件, 硬件设计的关键是一个高精度的稳定电流源。设计的电流

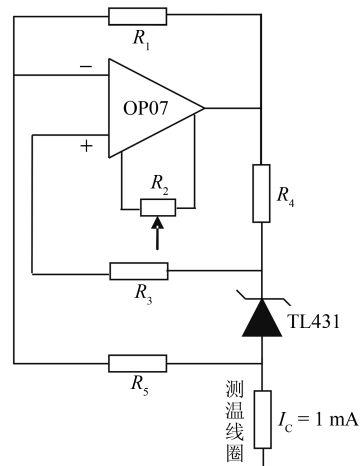


图 3 电流源电路原理图

源原理图参见图 3。该电流源通过了 1000 h 的不间断测试，电流稳定度在 0.1%。

在温度控制器的单片机程序中，首先采集电压模拟量，根据电压值计算出喷嘴处温度，并作为参考值来决定加热线圈功率的增减。再通过 RS232 串口发送不同的指令给安捷伦电源，控制电源输出不同电压和电流值给喷嘴处的加热线圈。指令格式需符合安捷伦电源的标准。

3.1.3 控制器本地代码设计

MSP430 单片机软件部分包括电压采集、指令下达、状态回读和网络数据传输等子程序。内靶温度控制系统的闭环特性对控制器的响应时间要求较为严格，其中包括 ADC 数据采集等操作部分的响应时间、远程控制响应时间、中断程序响应时间和计算温度值所花费的时间等。由于 MSP430 单片机运算能力有限，为了减轻控制模块运算负荷以及提高整个内靶温度控制系统整体性能，特将计算温度值部分的工作交给运算能力较强的前端服务器，在上层 C++ 程序代码中完成复杂的温度计算工作。

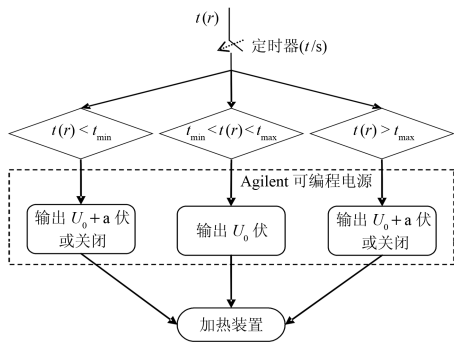


图 4 加热模块程序流程图

在上层 C++ 程序计算得到温度值后，根据温度具体情况近实时地以用户可干预步长去调节安捷伦可编程电源 3634 A 的输出到加热装置的电压和电流，以改变加热装置的发热功率。加热模块程序流程图参见图 4(假定输出电流固定，只需改变电压)。

3.2 真空与阀门监测/控制子系统设计

内靶装置中有 3 种真空规管和 3 种真空计，分别提供数字量或者模拟量。这些数字量或者模拟量表示真空规管处的真空度。这些数值通过硬件控制模块的采集传输，递交给上层的管理软件，显示在

控制界面上。为此，专门设计的真空控制模块支持 RS232 通信标准，既可以直接与具有 RS232 接口的真空计(TPG256/TPG261)连接，也可以采集只提供模拟量的真空计(IM520)的输出信号。控制模块也能够根据实际需要，发送指令给真空计，实现远程监测和控制。

真空控制模块的单片机程序主要实现操作 TPG256/TPG261、操作 IM520、网络通信和中断等子程序。

现场有若干种阀门，如 220 V AC 的气动阀门 DN63、超高真空电磁阀、Mini 超高真空电磁阀、24 V DC/50 mA 的气动 JET 阻挡板和限气挡板等。针对这些阀门的特殊电气要求，在专门设计的控制器上通过跳线选择来提供 6 路 24 V DC/10 A 还是 220 V AC/10 A 的控制信号。另外，每个阀门均设有两根状态线来表示其开/关状态，以确认开关动作是否完成。

真空模块和阀门模块在控制系统软件层交互信息，实现关联。

为了保护 CSRe 的真空，对于内靶装置两端与 CSRe 束流管线连接处的阀门，控制器内部作了连锁保护，当真空度过低(低于预设阈值)时会自动关闭，从而保护环内真空度免受内靶装置的影响。

3.3 分子泵监测与控制子系统

内靶装置中有 3 种分子泵，用来维持靶室内部的真空度，并且使内靶的运行不影响 CSRe 的本底真空度(5×10^{-9} Pa)。由于靶室内的真空度要求形成梯度(表 1^[1])，因此，各分子泵的工作参数如转速和功率等均不同，需要分别予以设定与监测。

表 1 团簇靶喷气级气压分布^[1]

位置	抽速/(l/s)	气压/Pa
喷嘴级	1500	2.3
第一差分级	1500	5.3×10^{-4}
第二差分级	500	1.2×10^{-6}
第三差分级	500	7.2×10^{-9}
第四差分级	500	1.4×10^{-9}

现场 3 种泵都支持 RS232/485 规范，可通过远程发送指令获取其工作参数或控制运行状态。

由于现场泵的数量较多，不可能为每个泵配备一台控制器。为此使用了 Xilinx 的高性能 CPLD 实

现的控制模块，使一个控制模块可以同时监测/控制 8 台分子泵。控制模块通过 8 条 RS232 串口发送指令，分别获得 8 台分子泵的当前工作状态，例如转速、功率、电压电流和温度等，将这些参数再通过模块上的以太网接口传送到上层控制界面，显示给用户。用户可根据这些参数判断分子泵的工作状态，并结合其他参数(如真空度)，返回指令给分子泵，对这些参数进行调节或者软启动、软停止等。所有采集的数据均可按照需要储存进 oracle 数据库中，便于实验后的分析。

获取泵的运行参数或者发送执行命令都需要通过 RS232 口与泵交换信息，而且指令和返回的参数都比较长，在软件设计中需要考虑 RS232 中断处理程序执行的速度问题，使得在相邻两次中断的时间间隔内，单片机足以处理完上次的数据。另外，为

为了更好地与上层软件协调，需要对泵返回的参数进行进制转化，将二进制转化为 ASCII 码。

3.4 数据处理与软件子系统

为了实现自动控制，自主开发了全部控制软件。上层软件(控制界面)是基于 JAVA 和 C++ 的 web 页面来设计的。将所有被控对象集中显示在一个界面上，方便用户监视。该界面有 4 个不同的菜单栏，每个菜单栏对应一类被控对象，通过切换不同的菜单栏可以选择不同的被控设备进行监测或控制。对于被控对象的操作指令使用多选窗口的方式，方便用户。系统软件内部负责数据处理、命令分配和数据存储，以及设备间的协调和关联。

上层程序通过 TCP/IP 协议发送指令给 3 种控制模块的网络接口部分，并接受控制模块采集来的状态和数据。该软件系统的运行界面如图 5 所示。

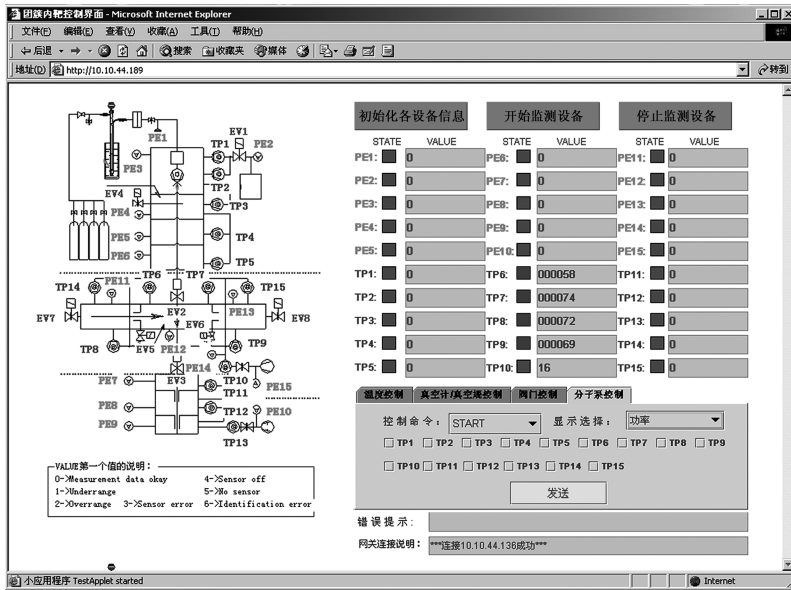


图 5 软件系统的运行界面

3.5 网络配置

目前在内靶控制现场总共配备了 6 台 3 种不同类型的控制模块，这 6 台控制模块都有自己独立的 Intranet IP 地址。这些控制模块通过网线连接到网络交换机，上位机同样连接到这个网络交换机。上位机中的用户程序通过访问不同的 Intranet IP 地址来区分不同的控制模块。上位机与该 6 台模块处于同一网段，可被同网段的其他授权的计算机访问。也可通过远程登录，在远离现场的中央控制室操作该上位机、监测和控制这些控制模块，从而控

制整个内靶系统的温度、真空度和阀门等对象。

4 结论

整个控制系统已经成功应用于 CSR_e 内靶装置现场。系统离线运行 6 个多月，长期稳定性好。实现了对内靶装置的远程监测和控制，性能优良。其中，阀门响应时间在 10 ms 之内，温度控制精度达到了 0.5 K，形成的真空梯度完全满足了 CSR_e 团簇内靶的实验需求。

在该控制系统的支持下，物理实验人员在 2010

年 1 月成功完成了第一轮辐射电子俘获实验。内靶远程控制系统稳定, 实现了温度、气压和设备状态的远程调节或监测, 完全可满足实验的要求(图 6)。



图 6 首轮内靶实验实现了高能氦离子束的冷却^[5]

参考文献 (References):

[1] Cai Xiaohong, Lu Rongchun, Cao Zhurong, *et al.* Nuclear

Physics Review, 2002, **19**(2): 281(in Chinese).

(蔡晓红, 卢荣春, 曹柱荣, 等. 原子核物理评论, 2002, **19**(2): 281.)

[2] Xia Jiawen, Zhan Wenlong, Wei Baowen, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2008, **20**(11): 1883(in Chinese).

(夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 强激光与粒子束, 2008, **20**(11): 1883.)

[3] MSP430x1xx Family User's Guide. Texas Instruments, USA, Feb. 2006.

[4] Zhan Lailong, Wang Yanyu, Huang Jijiang, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2007, **41**(5): 590(in Chinese).

(詹来龙, 王彦瑜, 黄继江, 等. 原子能科学技术, 2007, **41**(5): 590.)

[5] http://www.imp.cas.cn/xwzx/tpxw/201002/t20100204_2740135.html.

Design of a Control System for HIRFL-CSRe Internal Target Facility in Lanzhou*

WANG Yan-yu^{1, 1)}, LIN Fei-yu^{1, 2}, ZHANG Jian-chuan^{1, 2}, LIU Wu-feng¹, XIAO Wen-jun^{1, 2}, SHAO Cao-jie¹

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

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

Abstract: It is described in this paper the design of the control system for HIRFL-CSRe internal target facility, in which there are many different kinds of units need to be monitored and controlled. The control system is composed of several subsystems which are designed to control the gas-jet temperature, chamber vacuum, valves and molecular pumps. A human-computer interaction interface is also realized to do the data acquisition, data processing and display. The whole system has been working stably and safely, it fully meets the requirements of physical experiments in the internal target facility. In January of 2010, the first physics experiment of the radioactive electron capture was finished successfully with the aids of this control system.

Key words: CSRe; internal target system; control system

* Received date: 31 Mar. 2010; Revised date: 27 Jul. 2010

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10874188)

1) E-mail: yanyu@impcas.ac.cn