

CNIC-01627
SWIP-0149

HL-2A 放电控制系统初步方案
PRELIMINARY DESIGN OF HL-2A
DISCHARGE CONTROL SYSTEM
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01627
SWIP-0149

HL-2A 放电控制系统初步方案

蒋超 宋显明 李强
(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

摘 要

HL-2A 放电控制系统 (Discharge Control System, 以下简称 DCS) 是由一台或几台 VXI 工作站组成的全数字化控制系统。DCS 的主要工作是对极向场线圈进行测控, 这些线圈产生的磁场分别用以激发、维持和控制等离子体电流, 从而使等离子体产生并控制在规定的位置, 保持一定的形状。DCS 将对等离子体产生、形成、熄灭的全程进行控制、调整, 以保证物理目标的实现。另外, 它还有数据采集、信息上传、信息接收、连锁保护等功能。

关键词: DCS, VXI 工作站, 全数字化

Preliminary Design of HL-2A Discharge Control System

(In Chinese)

JIANG Chao SONG Xianming LI Qiang
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

HL-2A Discharge Control System consists of one or more VXI work stations so as to compose an all digital control system . The DCS are used to measure and control the poloidal coils, the main tasks of the poloidal coils are exploding, keeping and controlling the current of plasma. These coils explode plasma and keep it in the determined position.

Keywords: DCS, VXI work stations, All digital control

引言

HL-2A 是我国第一个具有偏滤器的受控聚变实验装置，其主机来自 ASDEX 装置，于 1996 年从德国运回，1999 年开始装置土建等前期工作，2000 年 10 月开始进行预装，预计在 2001 年底以前完成系统的工程调试并开始早期的工程实验。HL-2A 装置包括三台发电机和 5 套电源系统，它们分别是纵向场线圈电源系统、多极场线圈电源系统、径向场线圈电源系统、欧姆场线圈电源系统和垂直场线圈电源系统。线圈的最大电流约 45 kA，这些线圈产生的磁场分别用以激发、维持和控制等离子体电流。最大等离子体电流约 500 kA，等离子体电流的维持时间小于 10 s。装置线圈需要使用热水进行加热和烘烤，放电后用冷水对线圈进行冷却。装置真空室维持真空，放电时送入少量氢气或氖气。为了维持良好的第一壁条件，装置上还有真空清洗系统。德国运行 ASDEX 期间，采用了大量的模拟控制设备对装置进行了有效控制，取得了较好的实验结果。德国停止运行 ASDEX 后，建成了 ASDEX-U 装置，并在 20 世纪 80 年代初中期开始了控制系统的设计，目前该控制系统已经成功运用于装置的实验控制和保护。本报告介绍 HL-2A 装置的放电控制系统的初步设计方案，并对放电控制系统所使用的 VXI 计算机系统作了详细介绍。

1 控制对象

DCS 的控制对象是 HL-2A 的 4 组电源，它们分别是欧姆场线圈电源系统、垂直场线圈电源系统、径向场线圈电源系统和多极场线圈电源系统。这些线圈电源系统由 HL-2A 装置的三台脉冲发电机供电，线圈参数包括纹波、死时间、电源响应时间。

1.1 欧姆变压器线圈

其作用是，利用其通过变化电流时在 HL-2A 装置真空室内感应电动势使工作气体击穿，建立、维持并加热等离子体。该欧姆变压器为空心式的，其电气参数如下：

线圈数	2 × 12 个
总匝数	100 匝
最高工作电压	30 kV
与等离子体的耦合系数	0.47
线圈电感	8.4 mH
等离子体电感	3.7 μH
与等离子体互感	84.2 μH
线圈电阻	15 mΩ
线圈允许最大电流	30 kA
充电时间	0.5 s
平顶时间	5 s
线圈磁场储能	3.8 MJ
动态伏秒	2.5 Vs
平顶阶段伏秒	2.5 Vs

1.2 垂直场线圈

其设置的目的是在等离子体区域提供一可控制的垂直方向的磁场，除反馈控制等离子体电流的水平位置，还在等离子体电流的上升段提供约 10%左右的等离子体环电流。

线圈电感	0.34 mH
线圈电阻	2.2 mΩ
线圈时间常数	150 ms
允许最大电流	50 kA

1.3 水平场线圈

此线圈安装在真空室外纵场线圈内，其作用是在 HL-2A 装置中等离子体区域提供一可控制的水平方向的磁场，消除该区域的水平杂散场，对等离子体的垂直方向位移进行控制。

线圈电感	0.07 mH
线圈电阻	3.89 mΩ
线圈时间常数	18 ms
允许最大电流	± 4 kA

1.4 多极场与补偿线圈

它具有多组线圈，其设置的目的是产生 HL-2A 装置偏滤器场，形成孔栏半径内的磁分界面，用于控制等离子体截面形状，同时控制杂质，特别是重杂质，净化等离子体。变换线圈的联结方式，或按需要控制各线圈中电流的比率大小，可实现单零、双零偏滤器位形，以及圆形、椭圆垂直拉长、D 形、可变垂直拉长等多种等离子体电流横截面的运行模式。

	MP ₁	MP ₂	MP ₃	MC
匝数	4	8	4	4
电阻/(mΩ (20°C))	0.58	1.14	0.63	1.4
电阻 /mΩ (热后)	0.6	1.4	0.73	
电感/ mH	0.101	0.472	0.138	
最大电流/kA	45	45	45	45
平顶时间 /s		4.3		

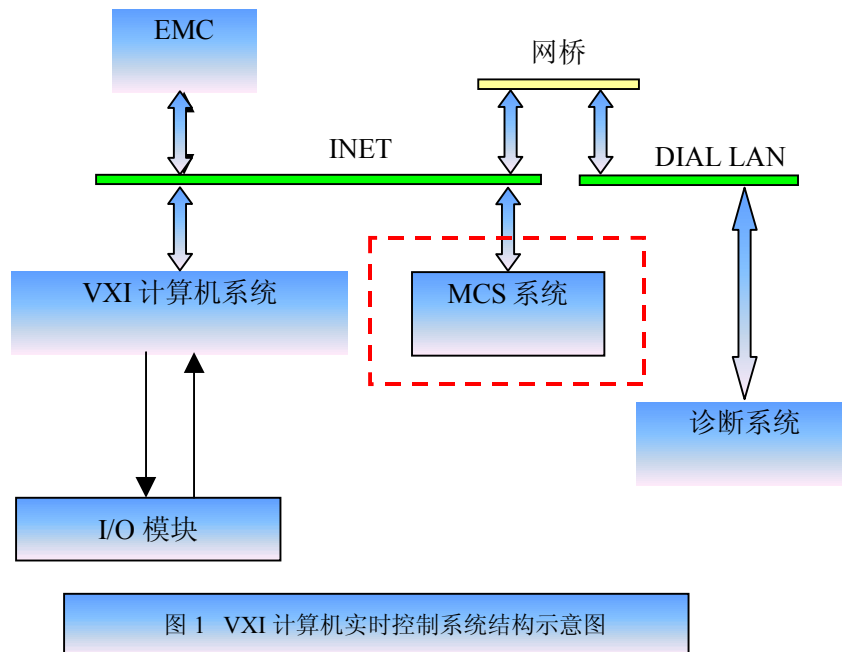
2 系统的控制目标

放电控制系统的任务是实现等离子体电流、位置、磁场位形和密度的实时反馈控

制。其主要内容有：

等离子体电流控制。即电流的大小和波形控制，主要由欧姆电源反馈控制。等离子体位置的控制，主要由垂直场电源和水平场电源快速反馈控制，要求电源控制回路的系统响应时间在 3 ms 以下。等离子体的截面形状控制，主要由多极场完成。等离子体的密度控制，由反馈控制脉冲送气机来实现。根据物理上的要求可能还有 β 值的控制、偏滤器尖峰分界点控制、MHD 活动模式控制等。这要联合使用各套电源、脉冲送气和辅助加热的反馈控制才能实现。

对于电流、位置、磁场位形的控制，采用基于 VXI 总线标准的计算机系统，实现控制周期小于 3 ms 的反馈控制，波纹度小于 1%，抑制等离子体破裂，延长等离子体放电时间。在发生破裂时，能自动限制线圈电流，防止线圈应力超过极限，与装置的其他保护系统连锁动作，使装置安全停机。V×1 计算机实时控制系统结构见图 1。

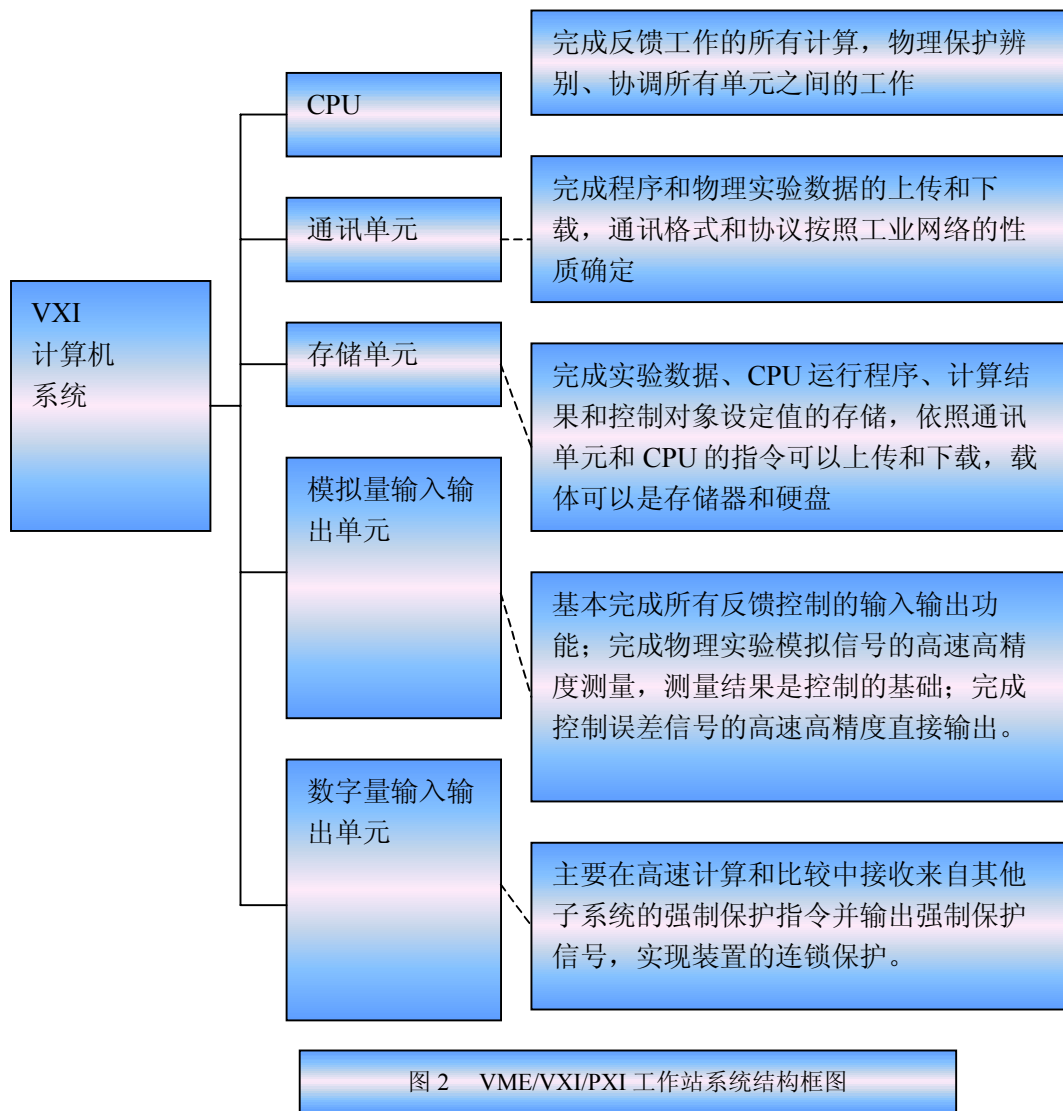


3 控制系统构成

本方案主要讨论等离子体电流、位移和形状控制。据此确定需要采集的输入信号有约 50 路，输出信号 15~20 路。

V×1 系统的主要部件有：CPU、通讯单元、存储单元、模拟量输入输出单元、数字量输入输出单元。V×1 工作站的结构框图见图 2。

反馈工作站的 VXI 计算机，要求 CPU 性能高、速度快、计算能力强、输入/输出响应频率高。程序的装载和调试通过 Inet 用 ECM 实现，通讯模块与工业以太网灵活通讯。现场调试可使用 RS232C 与计算机连接。



I/O 大部分为模拟信号，每道 I/O 缓存大于 200 kBytes。信号的采集和传输要求高速、高精度、高可靠性。

程序由 ECM 在远端通过 Inet 载入，所有采集数据和计算结果都要进行本地实时存储，放电结束后通过通讯单元传入 ECM，由 ECM 形成数据库记录在 DiaLAN 的数据库服务器存储。

VXI 工作站对实时采集的数据进行处理，快速识别各种事件，并通过其 I/O 和 Inet 向各子系统传播控制信号。

良好的可扩展性，I/O 量增加后可以方便地扩展。采用标准 VME 抗电磁辐射机箱，可能采用两个以上的机箱，两个机箱之间采用 MXI 或 1394 接口总线进行高速通讯。采用

软件由仪器制造商提供。

3.1 关于传感器

为等离子体位置控制设置的传感器有四种类型：罗氏线圈、磁探针、单匝环、电流传感器。其中，罗氏线圈是为了测量 I_p （等离子体电流）；磁探针是为了测量等离子体位置而设置的，总共有两套 8 个；单匝环是为测量 B_V 。与一次回路有电气连接的传感器必须进行隔离，输入信号的幅值进行调理后均应在 $\pm 5 \sim \pm 10 \text{ V}$ 范围内，最大分辨率为 12 位，采样频率为 10 KS/s。

3.2 执行机构

执行机构是指整流设备。输入信号经过处理后，由控制器将控制信号输出到整流设备，改变整流设备的输出，从而改变真空室内的磁场，控制等离子体的位置。控制信号的幅值规定在 $\pm 10 \text{ V}$ 内，最大分辨率为 10 位，电源响应时间为 3 ms。

3.3 运行过程

程序由 ECM 在远端通过 Inet 载入，所有采集数据和计算结果都要进行本地实时存储，放电结束后通过通讯单元传入 ECM，由 ECM 形成数据库记录在 DiaLAN 的数据库服务器存储。

VXI 系统工作的流程从输入单元采集传感器的信号开始，然后将采集到的数据传给 CPU 进行处理（或在采集板卡的 DSP、调理器上处理），将得到的输出信号通过输出单元输出。如果有紧急情况及各种工作状态需要传递，则通过输出单元或通讯单元传给上层实验控制计算机和其他系统。

4 极向场线圈在实验中的几种控制策略

4.1 正常运行时运行时序和控制策略

控制系统启动时序系统发出启动命令，真空室送气，真空室的本地压强达到 $1.33 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 。环向磁场线圈电源启动，偏滤器线圈电源启动，欧姆线圈电源启动，平衡磁场系统启动即垂直磁场线圈和水平磁场线圈的电源启动。接着各种诊断仪器和设备启动。当等离子体电流达到平顶时辅助加热系统启动。

4.2 控制状态良好，但已无法实现物理目标时的控制策略

首先将欧姆线圈停止工作，多极场线圈可停止工作，真空室送气停止工作，垂直场线圈和水平场线圈将继续工作，直到等离子体消失，依次停止垂直场线圈、水平场线圈和多极场线圈。

4.3 故障情况时的处理策略

除故障线圈快速退出工作外，同时将故障停机信息通知中控和电机系统，然后依照欧姆场线圈、多极场线圈、水平场线圈、垂直场线圈（除故障线圈外）的顺序，快速将这些线圈停止并退出工作。

致谢

本文是 HL-2A 控制系统的最初步设计方案，除了文章的作者以外，本组的樊明杰工程师、王明红工程师、李波高级工程师和毛淑英工程师均参加了本文的立论、方案调研甚至文字校对。其他与装置工程控制有关的工作组的工程科技人员以及 2A 研制部有关技术总负责人、领导对方案也给予了大力的关注并提出许多宝贵意见，在此作者一并表示诚挚的感谢。