

大容积真空容器的压强和流量远程监控系统

王玲¹, 马福民², 王小明¹

(1. 中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 同济大学, 上海 200092)

摘要: 为了精确地控制和调节 HT-7 托卡马克装置壁处理过程中真空室压强和流量, 特构筑了一套硬件上采用研华工控机、板卡及现场智能仪器, 软件上基于 VC++ 编程环境的监控系统, 通过相应的接口电路设计, 该系统很好地实现了真空室压强的负反馈控制和真空室进气流量的远程调节, 建立了 HT-7 大容积真空室充气系统的定量控制平台; 该远程监控系统的可靠性和先进性已在 2005 年春季 HT-7 壁处理实验中得到验证。

关键词: 托卡马克; 真空; 充气; 压强; 流量; 远程监控

Remote Control System of Pressure and Flow on Large Vacuum Vessel

Wang Ling¹, Ma Fumin², Wang Xiaoming¹

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Tongji, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to realize exact control and easy adjustment of pressure and flow of vacuum vessel on HT-7 Tokamak during wall conditioning, a set of monitoring and control system based on ADVANTECH hardware and VC++ software environment has been designed. By means of design of the relevant interfaces, it achieved feedback control and remote adjustment to the injecting gas. A quantitative control platform has been built in injecting gas system of large vacuum vessel on HT-7.

Key words: Tokamak; vacuum; inject gas; pressure; flow; remote monitoring and control

0 引言

HT-7 托卡马克装置是一个复杂的磁约束实验装置, 它是继法、日、俄之后世界第四大超导聚变装置, 它的子系统包括目前国内最大的超导磁体系统、低温系统、真空系统、脉冲电源系统和辅助加热系统等。在 HT-7 装置的子系统中存在两种工作机制, 脉冲运行机制, 如脉冲电源系统和控制系统, 实验脉冲持续时间为几十毫秒至数千秒, 脉冲期间控制系统要求 μs 级实时控制; 连续运行机制, 如真空系统和低温系统, 连续运行时间为一个月左右, 控制巡检周期为 s 级或分钟级, 真空系统的控制属于典型的慢过程控制^[1]。

HT-7 真空系统主要由抽气和充气两个部分组成。HT-7 充气系统目的是为托卡马克装置等离子体物理实验提供燃料气体 (H_2, D_2); 为调节等离子体与壁的相互作用, 减少暴露于等离子体第一壁的杂质, 提供清洗工艺气体 (H_2, H_2) 和涂层工艺气体 (气态硼化物等); 另外, 当内外真空室暴露大气时, 充入氮气 (N_2), 以尽量保护真空室和氮屏不被损坏。HT-7 装置等离子体放电过程中的脉冲充气系统将有另文论述, 本文只讨论 HT-7 装置壁处理条件下的连续充气控制系统的设计与实现。该充气系统分别由气体制备单元、气体注入单元和系统控制单元等组成。气体制备单元包括储气室、气源和气路的抽气及真空测量。气体注入单元由气体注入阀门、气体稳压罐和压力传感器等构成, 系统主要采用了美国 Veeco 公司的 PV10 型和俄罗斯的 PV60 型压电晶体阀和瑞士 Inficon 公

司的 VDE016 电控微调阀及其现场智能仪器等。

1 系统要求

1.1 HT-7 托卡马克装置实验对充气系统的要求

根据托卡马克装置实验要求, 充气系统在工程上应满足向内真空室注入纯净的单一气体或混合气体; 气流可定量调节, 范围为 $0 \sim 6 \text{ Torr} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2 壁处理条件下充气系统对控制的要求

- (1) 可实现内真空压强控制和注入气体流量调节;
- (2) 应具有现场手动和远程监控两种功能, 并可相互切换;
- (3) 应根据充气系统运行程序对各路进气阀门进行互锁; 当装置真空状态恶化或系统气路气压异常时自动关闭相关的阀门;
- (4) 系统应具有高可靠性和可扩展性, 人机界面友好, 显示直观, 操作方便。

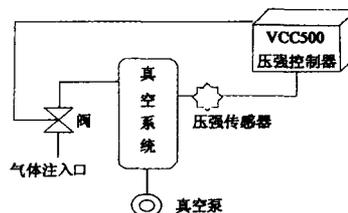


图 1 充气系统控制原理示意图

2 充气系统控制原理

如图 1 所示, 真空压强传感器、现场智能控制器和气体注入阀门构成了闭环控制。系统通过控制阀来调节真空容器的气体注入, 当真空容器内的压强上升超过预设值时, 阀门盖板往关闭方向运动, 当真空容器内的压强下降到低于预设值时, 阀

收稿日期: 2005-10-26; 修回日期: 2005-12-08。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10105009)。

作者简介: 王玲(1965-), 女, 高级工程师, 主要从事核聚变装置控制系统的设计和研发工作。

门盖板往开启方向运动; 当需要气体注入流量增大或减小时, 提高或降低预设值以使阀门盖板朝开启或关闭方向运动。

VDE016 电控微调阀主要是利用微电机驱动原理控制注入气体流量, 阀门开关响应时间为 100 ms, 可用于连续注入气体。

PV10 和 PV60 型压电晶体阀是利用压电晶体反压效应原理控制气体注入的气体流量, 压电阀开启时单位时间内流入真空容器内的气体量, 由真空理论计算为 $Q = \Delta P \cdot C_p$, 其中, ΔP 为注入气体前后真空容器内的压力差, C_p 取决于压电阀脉冲电源的电压幅值和脉宽。压电阀结构牢固简单, 开关响应时间为 2ms, 可用于快速注入气体。

3 远程监控系统的构筑

HT-7 托卡马克充气控制系统的设计主要是基于 VC++ 编程环境下和研华工控机 (IPC) 及板卡, VCC500 压强控制器、带电源的气量计 (GD)、TPG256A 真空计、脉冲放大电源和接口电路等硬件来实现充气系统的远程监控。

3.1 HT-7 充气控制系统硬件组成

本系统相关的硬件配置主要包括两大部分: 计算机及其板卡、现场真空充气设备及智能控制器。系统硬件框图如图 2 所示。

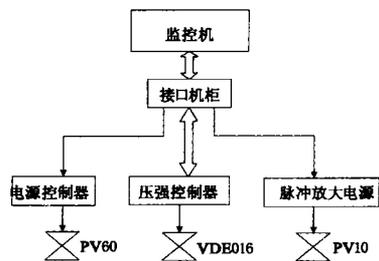


图 2 系统硬件组成框图

3.1.1 计算机及其板卡

由于该监控系统涉及各种不同类型的信号, 根据实验的需要我们选取如下板卡: 研华 PCL-726 多功能控制卡; 研华 PCLD-885 功率继电器输出板; 研华 PCLD-782 光隔离数字量输入板; 阿尔泰 BH5006 采集卡。

3.1.2 现场智能控制器

(1) PV10 和 PV60 型压电晶体阀的控制: PV10 阀在 0.1Mpa 工作压力下标准流量范围为 $0 \sim 70 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ 。开启阈值电压 40VDC, 正常工作电压为 50~100VDC。PV-10 型压电晶体阀主要是由一台专用的脉冲放大电源来驱动的。计算机系统通过 A/D 采集卡采集到真空规送出的 0~10VDC 电压信号, 通过程序计算比较, 计算机从 D/A 卡输出幅值 0~5V, 脉宽可调的模拟量信号, 送入脉冲放大电源, 电源输出 50~100VDC 电压以控制 PV10 阀门的开启。

PV60 阀在 0.1Mpa 工作压力下标准流量范围为 $0 \sim 72 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ 。现场一台带电源的气量计 (Gas Doser) 可同时控制两只 PV60 阀, 控制电源可在现场手动操作, 另配的遥控 (Remote) 和脉冲 (Pulse) 模式接口, 可以分别接收来自上位计算机的模拟量控制信号。计算机通过一路 D/A 输出 4~10V 电压信号送入气量计的 Pulse 接口, 另一路 D/A 输出 0~5V 电压信号送入气量计的 Remote 接口, 现场气量计控制 PV60 阀门的开启。在对 PV-60 压电晶体阀进行遥控时, 为了满足

气量计输入阻抗匹配的要求, 我们还特别设计了硬件接口电路。

(2) VDE016 电控微调阀的控制: VCC500 压强控制器是一种多功能控制器, 它可以实现真空室压强和流量的远程预设以及监控功能。控制单元框图如图 3 所示。我们既可以通过控制器来实现现场的手动操作, 也可以通过该控制器的微机接口来实现计算机的远程监控。在 HT-7 装置壁处理过程中用 VCC500 控制器来控制 VDE-016 电控微调阀、监测真空规 PKR251 输出的电压信号, 从而对真空室进行压强负反馈控制和流量的调节。

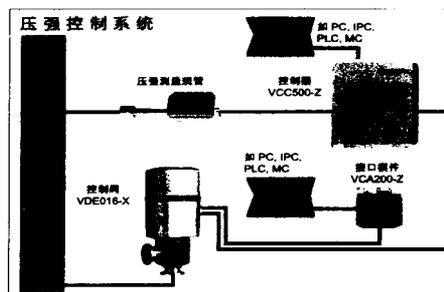


图 3 VDE016 阀控制单元组成图

VCC500 控制器既可以实现对数字量的操作, 也可以实现对模拟量的采集与控制。在对模拟量的输入、输出上我们需要将 VCC500 的 DB15 芯接口与计算机的 DA 卡 PCL726 和 AD 卡 BH5006 相连接。而对数字量的输入、输出, 我们则必须外配 24 V 电源并需要特别设计其接口电路。

(3) 真空测量: 充气系统中根据不同的真空压强范围选择不同型号的真空规来测量其真空度, TPG256A 多通道真空计可以接入 6 只规管, 可现场设定规管参数和上、下限压强保护值, 具有现场显示和控制的功能, 可通过 RS485 串口将检测到的真空压强值送入远程计算机。在此我们是直接从现场截取规管输出的 0~10VDC 电压送 BH5006 数据采集卡采集, 通过其对应的函数关系转换, 我们可以在上位机界面上实时监测真空室的真空度变化。真空采集单元框图如图 4 所示。

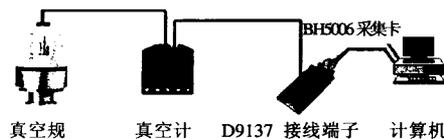


图 4 真空采集单元示意图

3.2 HT-7 充气监控系统软件设计

本系统监控程序基于 Visual C++ 6.0 编程环境, 软件结构分为数据采集模块、监控模块、数据库管理模块和网络通信模块等。

3.2.1 数据采集模块

监控系统中的数据采集主要用来反映现场真空测量信号的变化, 采用阿尔泰 BH5006 模拟量采集卡, 该板卡的开发商提供了一个 Windows 的标准开发环境, 同时还提供了 Windows 的标准动态链接库文件, 该卡的 A/D 启动方式为程序启动。采集模块的实现过程主要包括两个部分:

(1) 数据预处理: 从数据采集板中读入的数据是 12 位的数字量, 为了把数字量转换成具体的测试数值, 需要进行采样

数据的标度变化,即 LSB 码制到电压值的转换。

12 位的 A/D 转换器输出的数字量,即 LSB 码值为 0~4095,可以用以下公式把它转换成 0~10V 的标准电压值 $V=10.0 * ad_data / 4095.0$

再经函数关系转换得到真空压强值:

$$P=101.667 * U - 9.333$$

(2) 数字滤波:现场强磁场的干扰,有可能影响到测量数据的有效性,在系统软件中对个别精度要求较高的通道(比如内真空室的压强),采用 10ms 的均值滤波来消除干扰。在对某一通道进行测量时,连续对该通道采样 10ms,采样的间隔为 1ms,把所有的采样值相加求和,再除以采样点数,得到的值即为该通道的测量值。这种方法编程简单,效果较好。

3.2.2 监控模块

监控模块主要是实现对系统内真空设备的远程监控,通过上位机操作界面,以按钮实现了对各级阀门的远程操作;通过按钮颜色的变化反映了现场设备工作状态的变化;通过操作按钮的反色实现了阀门操作的安全连锁;通过对滚动条的微调节来调控阀门的开度,实现了对流量增加、减小的远程操作。

(1) 程序实现压强控制和流量的调节:真空室器壁放电清洗实验期间由 PV-60 压电晶体阀或电控微调阀 VDE-016 控制对真空室进行连续注气,并由装置窗口法兰处的真空规反馈控制阀门的进气量。由于在托卡马克装置壁处理过程中,对真空气压的严格要求,在工程上实现对压强和流量的预设以及负反馈控制,显得至关重要。

① 压强和流量的远程预设:系统中对压强和流量的预设主要是在上位机监控界面上通过输入预设值和拖动滚动条来改变预设的真空压强值和流量值,预设值经计算机 DA 板卡输出送往 VCC500 控制器的模拟量接口,阀门的开度将随给定值的变化而变化,由此,实现流量和压强的远程预设。

② 压强的负反馈控制:在流量模式下:压强的负反馈控制主要是通过软件编程实现的,根据壁处理条件下的工作要求,通过对比装置真空室的真空状态,按照需求进行流量调节以满足壁处理期间对装置真空室内真空压强的要求。

在压强模式下:VCC500 控制器接收到压强的预设值,同时接收到 PKR251 真空规采集的真空度数值,通过二者压强大小的比较,得到差值并经过 PI 和 PID 运算,从而实现进气阀门开度的自动调节,以满足壁处理期间对装置真空室内真空压强的要求。

(2) 脉冲送气的实现:在等离子体放电过程中,如果需要脉冲补气,首先对本次脉冲送气的脉冲波段数目、高、低电平的持续时间以及高电平的大小进行设定。其中,高电平的大小对应于压电晶体阀的开启电压,而高电平的持续时间则对应于压电晶体阀的开启时间。这样,在放电开始后,系统将会自动按照所期望的脉冲形式通过对 PV-60 或 PV-10 压电晶体阀的操纵,实现对装置真空室的脉冲送气。

另外,在实验过程中当装置窗口法兰连接管道上的真空规测得气压达到 0.1 Pa,将自动关断压电晶体阀。脉冲注气时控制压电晶体阀的打开时间为 1 ms~1 s 范围可调,打开幅度对 PV-60 为恒定,对 PV-10 为 0~5V 可调。

3.2.3 数据库管理模块

一个完整的监控系统,不但要采集数据,同时需要存储数据。由于普通文件系统中缺少数据表格的整齐、直观性,在这

里我们使用了 Microsoft Access 2000 数据库系统。

本系统数据库管理模块的实现步骤简单描述如下:

(1) 因为 ODBC 应用程序不能直接使用数据库,用户必须为要使用的数据库注册数据源。注册数据源的工作由 ODBC 管理器完成。

(2) 在充气监控系统的应用程序内添加新类(Crecordset 类),并为其选择对应的数据源,以及记录集类型(在这里我们使用 Snapshot)。

(3) 在应用程序的 stdafx. h 头文件中包含 #include <afxdb. h>,用 ClassWizard 创建一个 Crecordset 的派生类。ClassWizard 可以为派生的记录集创建一批数据成员,这些数据成员与记录的各字段相对应。

(4) 通过调用 AddNew 成员函数向记录集中添加新的记录,并调用 Update 函数把字段数据成员中的内容作为新记录写入数据源并结束添加。

3.2.4 网络通信模块

为了更好地满足实验的需要,使得监控系统可以实时地跟踪实验中放电炮号的变化,我们在系统内增加了基于 SOCKET(套接字)的网络编程。

在 VC++ MFC 中 Microsoft 为套接字提供了相应的类 Csocket。Csocket 提供的通信为同步通信,数据未接收到或是未发送完之前调用不会返回。Csocket 对 TCP 提供支持,通过 TCP 协议我们可以与指定 IP 地址的主机建立连接,同时利用建立的连接可以双向地交换数据。这种有连接的数据交换采用 C/S 模式,在服务器方需要建立一个监听套接字,然后在此套接字上等待连接。当连接建立后会产生一个新的套接字用于通信。而客户方在创建套接字后只需要简单调用连接函数就可以创建连接。对于有连接的通信不论是数据的发送时间还是发送与接收的顺序都是有保证的。

本系统内主机作为客户端创建本地套接字(Create()),在接收到放电触发信号后向炮号服务器发出连接请求(Connect()),并指定端口和炮号服务器地址,如果连接成功就用已创建的本地套接字与炮号服务器端进行通信,通过 Receive()函数实现数据的接收,从而获取了当前实验的放电炮号。

4 实验结果

该远程监控系统自 2004 年 9 月开始设计,2005 年 5 月完成了系统的工程调试,已用于 2005 年春季 HT-7 氧化实验和壁处理实验。该项工作实现了 HT-7 壁处理条件下充气系统的远程监控,为我所即将建成的大型超导托卡马克装置真空充气系统的设计提供了工程经验。

参考文献:

- [1] 王玲. 集散控制系统在大型核聚变装置中的应用 [J]. 机电工程, 1999, 5, 176-178.
- [2] 王小明. EAST 托卡马克装置真空充气系统设计方案 [C]. EAST 工程文集, 2000.
- [3] 王玲. EAST 装置真空系统控制方案的设计 [J]. EAST 工程文集, 2004.
- [4] 王小明. EAST 托卡马克装置真空充气系统的控制要求 [C]. EAST 工程文集, 2002.
- [5] 刘智民. 中性束注入器 Tank 充气特性对离子源放电的影响 [J]. 真空科学与技术, 2004, 5: 355.