

EAST 技术诊断系统监控子系统分析和设计

钱 静, 翁佩德, 罗家融, 陈灼民

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: EAST 是为科学研究建造的全超导核聚变实验装置。根据 EAST 的实验特点和性能要求, 技术诊断系统数据监控子系统采用管理层、控制层和现场设备层 3 层网络结构完成对装置的监控, 通过采集卡和以太网实现信号采集及数据的传送。在 EAST 工程调试实验和两轮放电实验中, 该数据监控系统成功实现了对 EAST 装置的运行状态和故障诊断的实时监控, 表明该系统具有性能稳定、可靠等特点。

关键词: 全超导托卡马克 EAST; 技术诊断系统; 数据监控子系统

Analysis & Design of Data Monitoring Subsystem of Technical Diagnostic System for EAST

QIAN Jing, WENG Pei-de, LUO Jia-rong, CHEN Zhuo-min

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

【Abstract】 EAST is a fully super-conducting experimental device for nuclear fusion scientific research. In the data monitoring subsystem of its technical diagnostic system, three-layer network structure is applied to monitor EAST equipment which consists of management floor, monitoring floor and field floor, while acquisition cards are used to collect signal, data transmitted by Ethernet according to the characters and performance requirements of EAST experiment. In engineering commissioning and twice discharge experiments of ESAT, the data monitoring system realizes real-time condition monitoring and fault diagnosis. The system is proved to be with steady and reliable performance.

【Key words】 fully superconducting Tokamak EAST; technical diagnostic system; data monitoring subsystem

1 概述

EAST装置是世界上第一个建成的具有非圆截面的全超导托卡马克装置, 分别于2006年9月和2007年1月成功进行了2次放电实验, 完成了从工程建设到正常运行的转变。为实现极长脉冲及稳态运行, EAST装置的极向场(PF)系统和纵场(TF)系统都采用了NbTi CICC导体(Cable-in-Conduit Conductor)绕制的超导磁体^[1]。

为保证装置的正常运行并有效降低热负荷, 装置分层设置并独立支撑从高温等离子体区域至4.5 K(液氦温区)低温超导磁体、80 K(液氮温区)冷屏及293 K(室温)外真空杜瓦等不同温区的部件^[2]。放电实验期间, 纵场磁体以稳态方式运行, 正常运行电流为14.3 kA(温度 $T_b=4.2$ K)和16.351 1 kA(温度 $T_b=3.8$ K) 这时相对应的最高磁场强度分别为5.85 T和6.72 T。而极向场超导磁体以脉冲方式运行, 通电电流最大为14.3 kA, 最大电流变化为-19.3 kA/s。

EAST托卡马克核聚变装置中的磁体系统全部采用CICC超导体, 由于超导体本身需要在超低温条件下(液氦温度)工作, 因此装置在运行前需要进行较长时间的降温过程(Cooling-Down)。能否将磁体降温至极低的工作温度, 并在此温度下长时间稳态运行是 EAST 核聚变装置能否实现预定物理目标的关键。在各种热负荷作用下, 超导磁体系统温度不均匀变化, 其温度及热流的分布将影响到整个磁体系统性能的稳定。

技术诊断系统是超导托卡马克的重要子系统, 其主要任务是监测装置的运行状况, 为运行人员了解装置状况提供信息, 从而实现装置的安全、正常运行, 因此, 需建立能长时

间稳定工作的技术诊断系统。技术诊断系统的数据监控子系统及时、准确地采集装置现场的有关信号, 实时显示和存储数据, 并根据信号数据和物理设计人员的要求进行诊断报警操作。

2 数据监控系统方案

(1) 监控参数概况

数据监控子系统需要监控的参数主要包括: EAST 主机各部件(内真空室外壁体及真空室窗口、内冷屏壁体及上、下、水平颈管、外冷屏筒体及底盘、电流引线单元、超导线圈入、出口)的温度, 超导磁体的运行电流, 超导线圈电阻, 超导磁体的失超信号, 装置受力冷质部件的应变, 冷屏和磁体位移以及真空室烘烤控制系统的控制信号等。

(2) 总体测控方案

在企业内部网(Intranet)的基础上建了一个独立存在的技术诊断数据监控系统虚拟局域网, 技术诊断系统信息集中在虚拟局域网上, 企业内部网与技术诊断数据监控系统虚拟局域网两者完全物理分开, 仅通过带有防火墙的路由器通信。这样的网络结构在保证资源共享性的同时又具有较高的安全性, 可有效地防止虚拟局域网被非法入侵。

根据监控点多又分散的特点, 本系统方案确定为分布式实时监控系统, 采用基于 Ethernet 的虚拟局域网将系统从逻

基金项目: EAST 国家大科学工程基金资助项目(计投资(1998)1303)

作者简介: 钱 静(1975 -), 女, 工程师、博士研究生, 主研方向: 超导托卡马克核聚变实验装置主机技术诊断; 翁佩德, 研究员、博士生导师; 罗家融, 教授、博士生导师; 陈灼民, 研究员

收稿日期: 2007-06-30 **E-mail:** jing@ipp.ac.cn

辑上划分为 3 层，分别是现场层、监控层和管理层，原理框图如图 1 所示。

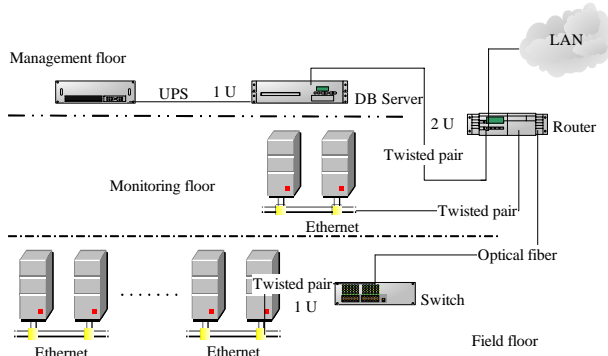


图 1 数据监控系统原理框图

现场层的功能主要是：信号调理，数据采集和网络通信。监控层的功能主要是：远程控制现场层计算机动作并监测其运行状态，数据处理，数据显示，数据分析与报警和网络通信。管理层的功能主要是：统一数据监控系统内网的时钟，数据处理，数据存储和网络通信。

3 数据监控系统软硬件配置以及系统特点

3.1 信号获取

数据监控系统现场层为典型的分布式传感器监测系统，EAST 装置的有关参数通过各种传感器、相应的激励信号源、信号调理电路转换成采集卡可以识别的信号，图 2 为温度信号的获取电路框图。

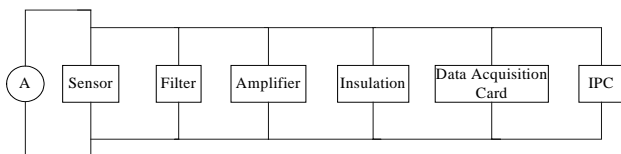


图 2 温度信号的获取电路框图

由于 EAST 工程组对技术诊断数据监控系统的监控参数有较高的精度要求，因此对有关信号普遍通过具有滤波、放大功能的硬件电路进行调理，在 A/D 转换前进行信号隔离，防止装置上的强电可能对数据监控系统产生的高压危害。激励信号源的精度和稳定性有严格的要求，比如电流源精度达到 0.3%。温度漂移和时间漂移可忽略。此外采用精度达 16 bit 的高精度多通道的高速采集卡采集待监控参数。

3.2 软硬件配置

现场层根据待监控参数的物理特性以及所需的数据采集通道数量，采用 9 台工控机进行数据采集，每台工控机独立实现对装置现场有关状态参数的采集。优点是各台工控机处理的参数类型比较统一，配置和处理比较简单，各类型参数数据采集之间没有影响，可靠性相对较高。通过交换机、双绞线、光纤链路和路由器实现与其他层的通信。监控层主要由 2 台工控机实时显示 EAST 有关状态参数，并根据数据分析的结果判断是否需要报警操作，需要报警则驱动相应硬件动作。管理层主要由数据库服务器、路由器、不间断电源 UPS 组成。监控层和管理层都通过路由器实现与其他层的通信。现场层和监控层采用 MS Windows 2000 Professional 操作系统，管理层采用 MS Windows 2003 Enterprise 操作系统。应用软件开发平台是 Visual C++ 6.0。

3.3 系统应用软件的主要功能

数据监控系统实现的主要功能是：数据采集，数据处理，

数据实时显示，数据分析，网络通信和数据存储。

数据采集功能在 EAST 实验的整个阶段采集装置的待监控参数，同时对采样数据进行了软件数字中值滤波处理，提高了系统的抗干扰能力和数据的准确度。

数据处理功能主要是对现场层工控机发送来的数据，即待监控参数的电压值进行数值转换，转换成对应的物理量。

数据实时显示功能实时显示 EAST 有关状态参数，并且分 2 种形式进行显示：一是根据采集卡编号进行归类，使用列表显示，优点是利于实验值班人员查找故障点，一次显示的数据多；二是根据参数的物理意义进行归类，使用图片显示，优点是能够清晰地表现数据所反映的物理含义。

数据分析功能主要是根据实时采集的数据、物理实验人员的理论计算及实验经验来分析装置当前是否可能出现局部失超现象，如果判断出可能出现失超现象，则发出报警信息。

网络通信功能对于现场层而言，主要是发送实时数据到监控层、管理层；接收监控层的远程控制信号和运行状态查询；接收管理层的时间统一信息。

监控层主要是接收现场层的实时数据，发送对现场层的控制信号以及内网所有计算机的状态查询信号，接收管理层的时间统一信息以及与企业网内其他子局域网的数据通信。对于管理层而言，主要是接收现场层的实时数据和监控层的计算机状态查询信号，向其他层发送时间统一信息。

数据存储功能指管理层数据库服务器将现场层采集到的实时数据经处理后存储到设计好的 MS SQL Server 数据库中，以便实验结束后的分析研究。

3.4 数据监控系统的特点

(1) 信号电压幅值范围广。温度信号从低温(液氮温区、液氦温区)到常温区变化，选择的传感器不同，相应温度信号的电压值在几百微伏到较强的几百毫伏之间变化。而纵场超导磁体通电电流信号的电压值则在 0 V ~ 10 V 间变化。

(2) 信号种类和数量多。信号类型包括温度、超导磁体线圈电阻、失超探测信号、电流、位移、应力等，各种类型的信号合计有 555 个。

(3) 信号传感器类型多。为了适应不同的工作温区，温度传感器有 Cernox 电阻温度计、Pt100 电阻温度计、Pt1000 电阻温度计以及俄罗斯碳电阻温度计 4 种。某些信号可直接测量电压；而诸如位移、应变等信号需要专门设计的传感器件。

(4) 测量精度要求高。EAST 工程项目组对液氮温区的温度测量要求精确达到 10 mK，而液氦温区的温度测量要求精确到 0.1 K。对于安装在液氮温区装置部件冷却管路上的 Cernox 温度计，在液氮温度附近时，当温度变化 1 K 时，温度计两端电压约变化 14 mV。为了满足测量精度要求，测量必须精确到 10 μV。为了提高测量信号的信噪比，对此类信号进行前级放大 100 倍的处理，并且采用了 16 bit 精度的数据采集卡。

(5) 系统运行时间长。根据上 2 轮实验运行的经验来看，数据监控系统至少需要稳定运行 2 个月左右。

4 数据监控系统应用软件的重点开发技术

重点开发的数据监控系统应用软件技术有信号通道属性的处理、数据处理、多线程技术、网络通信的设计和存储的方案。

4.1 信号通道属性的处理

采集卡采集的每个通道有以下属性：计算机编号，采集

卡编号,采集卡通道号,信号物理名称,传感器类型,传感器型号,放大倍数,零点漂移,恒流源和信号单位。只有这些属性得到确定,才能根据采集到的电压数值换算得到相应的实际物理量数值。这些属性会在实验过程中发生变化,因此,现场层的应用软件需要可以随时察看并且应用变化后的属性数值。每块采集卡使用一个初始配置文件保存其所有通道的初始化属性,每次程序运行时就自动加载该初始配置文件。对于发生变动可能性较大的属性如放大倍数、零点漂移、恒流源,则在软件中利用属性页随时查看、更改并且保存到初始配置文件,也可以直接在初始配置文件中更改相应的属性值。

4.2 数据处理

在监控层和管理层需要对现场层发送来的数据进行计算,将经过调理的电压信号还原成对应物理信号的物理数值。这包括 2 个步骤:(1)量值的还原,即将采集到的电压信号还原成经过调理前的状态。(2)物理量的转换,即将电压数值换算成对应物理量。如将温度信号的传感器两端单位为 V 的电压数值换算成单位为 K 的温度数值。

由于需要采集的信号数量和类型多,换算公式不同,因此创建了一个类 CdataCalc Template 专门进行数据处理。每块采集卡采集的待监控参数类型比较一致,因此,在该类中创建 8 个成员函数,分别对应系统中 8 块采集卡的数据进行数据处理。

4.3 多线程技术应用

数据监控系统具有强的实时性要求,如信号采集和通信、信号显示和处理等不允许有较大的延迟,否则会造成丢失数据或者不能显示实时数据。信号处理与分析运算量相对比较大,但是以 1 000 ms 为周期,期间必须完成信号的采集、通信、处理、显示、分析报警和存储操作。此外,当用户干预系统时,应用软件应快速作出反应,立即执行相应的操作。

Windows 的多线程技术以“资源分时共享”为原则,大大减少了并发执行的时间和空间开销,合理运用该技术可有效地解决数据采集、网络通信、数据处理、数据显示、数据分析与报警和数据存储的实时多任务问题。通过互斥同步对象和全局变量,解决多线程之间复杂的同步问题,提高系统的实时性和稳健性。

数据监控系统现场层和管理层应用软件设计时都采用了 3 个线程。主界面线程用于显示当前状态并处理菜单命令和其他消息,还有 2 个工作者线程,如图 3 所示。

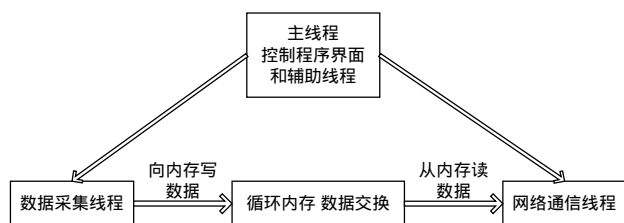


图 3 现场层线程间的关系

对于监控层应用软件设计时都采用了 3 个辅助线程,主界面线程主要实现物理参数的实时显示;网络通信线程实现与现场层、管理层计算机之间的信息交换;数据处理线程及时处理网络传来的实时数据;数据分析与报警线程实现在线的装置状态故障诊断,对装置实验每次通电放电前、放电期间以及放电后一段时间内的数据进行实时分析,各线程间的关系见图 4。

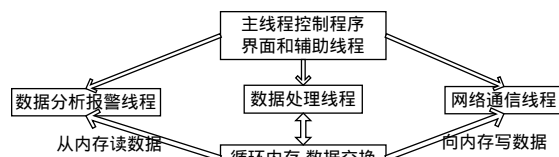


图 4 监控层线程间的关系

4.4 网络通信的设计

在 VC++ 6.0 编程环境下,采用 MFC 中提供的 CSocket 为基类,采用流式套接字方式(即面向连接的协议 TCP)和数据报套接字方式(即面向连接的协议 UDP)开发网络通信程序。网络通信中的数据流类型主要包括实时数据流和事件数据流。实时数据流指按 TCP/IP 协议族中的 TCP 协议在网络中传送的采集到的实时数据。事件数据流包括按 TCP/IP 协议族中的 UDP 协议在网络中传送的信号,如监控层主控计算机对现场层计算机的远程控制信号和其对虚拟子网内所有计算机状态查询的信息,以及按 TCP/IP 协议族中的 TCP 协议在网络中传送的时钟统一信号和信号通道属性信息。

TCP/IP 协议族中的 UDP 协议虽然不提供可靠的数据传输,但实现简单、速度快、实时性好、支持广播和组播,适用于本系统这类单一、封闭的局域网,可靠性也比较高^[3]。而 TCP/IP 协议族中的 TCP 协议能够提供一种可靠的面向连接的数据传输方式,在需要发送大批量数据按顺序无重复地到达目的地的应用场合,是最适合的。

为便于分析处理网络通信中的数据,根据通信的内容对网络通信协议进行了改进。数据监控系统虚拟局域网内部的通信协议数据格式如表 1 所示。

表 1 网络通信协议数据格式

帧结构	Head	Type	Data Type	FrameID	DataSize	Data
含义	指明通信双方计算机编号	帧信息类型	数据类型	帧编号	数据段长度	数据段

其中,数据类型包括信号通道属性信息、时钟统一信号和装置状态参数实时数据,相应的数据段长度为 3 864 B、536 B 和 4 B。

4.5 数据存储的方案

现场层通过 ODBC 接口与管理层数据库服务器的 SQL Server 2000 数据库进行通信,完成装置有关状态参数的实时数据入库操作,共有 8 个数据库,数据字段包括当前采集时间和 64 个信号。此外,数据库 Current 保存了所有恒流源通道的电流数值,并且随时可以加载到应用软件中。数据由 SQL Server 2000 存储与维护,实现了数据的集中管理和虚拟子网内信息的交换与共享。

5 结束语

EAST 技术诊断数据监控系统成功地实现了远距离信号采集、实时监控与数据存储的功能。系统结构紧凑、性能可靠。该系统在过去的 2 轮实验中运行稳定可靠,各项功能均已达到设计要求,保证了物理实验人员及时了解装置的工况以及事后历史数据的分析处理。

参考文献

- [1] 潘引年. 超导纵场磁体系统的研究与制造[C]//HT-7U 装置设计文集. 合肥: 中科院等离子体所, 2002.
- [2] 陈灼民. 全超导托卡马克装置(EAST)的技术诊断系统[J]. 低温与超导, 2007, 35(2): 1-4.
- [3] Steven S W R. TCP/IP Illustrated Volume 1: the Protocols[M]. [S. l.]: Addison Wesley, 1994.