

EAST 中央控制系统

孙晓阳¹, 罗家融^{1,2}, 季振山¹, 吴一纯¹

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 东华大学, 上海 200051)

摘要: 描述了 EAST 中央控制系统和 EAST 虚拟合作实验室系统的体系结构和各个部分的主要功能和设计思想。EAST 中央控制系统主要功能是协调统一各个控制、诊断、采集子系统, 为各个子系统提供统一的控制接口。EAST 中央控制系统制定和规范了与各分控系统之间的通信协议, 加强了对各分控制系统的控制, 统一和规范了控制数据的发布和控制参数的设置。系统按照功能模块设计和实施, 有效地提高了系统的升级和扩展能力。

关键词: 中央控制; 虚拟合作; 数据库; 远程控制; EAST 全超导托卡马克

中图分类号: TL67

文献标识码: A

1 引言

EAST 全超导、非圆截面托卡马克实验装置由主体反应堆和众多子系统组成。首批投入的控制和诊断系统包括等离子体控制系统、极向场电源系统、低杂波电流驱动系统、真空系统、低温系统、技术诊断系统、失超保护系统和高温超导电流引线系统等。由于整体系统规模较大、众多子系统分散在不同和相对独立的空间位置以及存在多种系统运行平台等因素^[1], 协调和统一管理数量众多的控制、诊断子系统是 EAST 中央控制系统设计和开发的基本出发点。基于 EAST 装置的分布广、子系统数量众多、跨多系统平台的特性, EAST 中央控制系统采用分布式体系结构, 由分布在不同位置的计算机、网络、应用软件、时钟模块和硬件光电设备等组成。EAST 中央控制系统的主要功能是实现 EAST 系统的放电控制、监控、安全连锁保护以及提供数据采集、存储、应用等服务, 为各个控制、诊断子系统提供统一的本地或远程控制接口, 实现各个子系统协调工作。EAST 中央控制系统已经在 EAST 装置的 2006 ~ 2007 年度的实验中成功应用。

2 EAST 中央控制系统体系结构

EAST 中央控制系统由实现特定功能需求的一系列软件系统、硬件设备和网络平台组成。EAST 中央控制系统作为大型实验装置的应用控制系统, 要求具有较高的可靠性和较长的生命周期, 并且可以随着物理实验的发展要求, 灵活方便地实现系统扩充、易于维护和变更。基于系统可靠性、灵活性、健壮性和可扩充性等设计要求的考虑, 采用模块化的设计方法将系统按功能特性划分为相应的功能模块。图 1 为 EAST 中央控制系统的体系结构图。整个中央控制系统主要包含放电控制系统、控制终端、控制管理数据库、中央时钟与触发控制系统、安全连锁与保护系统、数据采集和数据服务系统、中央授时系统。

2.1 放电控制系统

放电控制系统是整个中央控制系统的核心部分, 控制着整个 EAST 放电过程。放电控制系统的主要功能是对多个子系统进行集中管理, 协调和统一各个控制、采集和诊断子系统的工作, 监控、控制和管理放电过程, 实现放电过程可控性, 使系统的使用者可以通过在控制室内的中央控制台或通过远程控制终端来实现对分布在不同物理空间、基于不同运行平台的子系统进行远程/本地的实时控

收稿日期: 2008-02-26; 修订日期: 2008-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475079; 10675128); 中科院合肥物质科学研究院知识创新工程领域前沿项目(075fcq0122)

作者简介: 孙晓阳(1979-), 女, 吉林人, 中科院等离子体研究所在读博士研究生, 研究方向为数据采集与控制系统、虚拟合作实验室。

制和监控。放电控制系统主要包括放电过程控制和放电监控等主要功能模块。

放电过程控制系统实现对控制、诊断子系统和硬件设备的集中管理,根据放电控制逻辑实现对放电流程的控制。EAST 放电过程分为 4 个阶段:等待放电、准备放电、放电和停止放电。图 2 为 EAST 系统的放电控制逻辑图。系统经过初始化以后首先进入停止放电阶段,在各系统都通过安全巡检后,系统进入到等待放电阶段。进入等待放电阶段后,根据运行模式的不同采用不同的控制方式:a.在自动模式下,系统内部的软件秒级计时器开始工作,当系统的等待时间达到设定的放电间隔(两次放电

之间必须等待的时间,保证各子系统有充足的时间恢复到正常状态),将进入到各系统准备阶段;b.在手动方式下,系统将等待用户手动发出开始放电命令。在系统准备阶段,实验大厅的警报将响起,表明马上将要进行放电实验。在这个阶段中,放电控制系统向各个子系统发送相关的控制参数等必要信息,各个子系统将要检查本系统的准备情况,并把状态信息发送给监控系统。在各系统放电准备完毕以后,监控系统将根据系统设定时间向中央时钟模块发送“预触发”命令启动中央模块,由触发系统发出基准零时刻触发脉冲,进入等离子体放电阶段。放电结束后,又进入下一次的等待放电阶段。

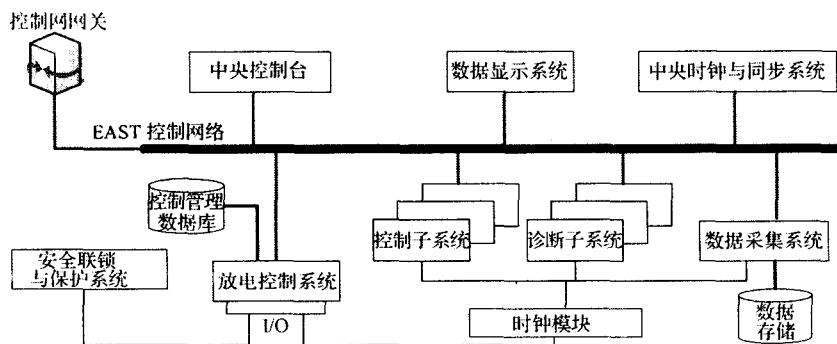


图 1 EAST 中央控制系统体系结构

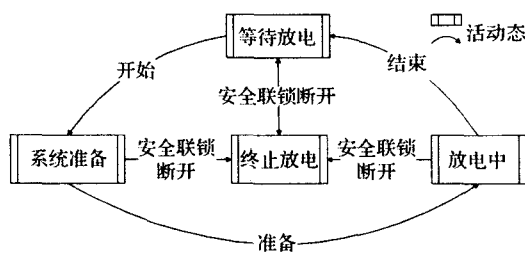


图 2 放电控制逻辑

放电监控系统在放电准备阶段监控各子系统准备情况,一旦关键子系统返回子系统出错信号,系统将定位并提示出错系统,返回放电等待阶段。在放电的整个过程中,放电监控系统在不断地监测安全联锁信号,当发现异常,将马上进入停止放电状态,放电监控系统向各个子系统发出故障信号,各个子系统将重新复位。当故障解除后,系统将重

新进入到等待放电阶段,准备开始下一次的放电。

为了保证放电控制系统的稳定性和可靠性、减少开发成本,EAST 放电过程控制系统选择 Linux 操作系统为系统开发和运行平台。根据安全保护要求,过程控制系统在运行中要每 25ms 检测一次安全联锁信号,通过定时检测 I/O 卡的输入信号的状态来实现的。Linux 计时器的时间精度与操作系统内核版本有关,经测试在 Linux 内核版本 2.6.x 下采用 settimer 函数通过消息响应的方法可以实现毫秒级的精确计数,完全可以满足毫秒级的安全监测需要。

2.2 控制管理数据库

采用关系数据库与文件管理相结合的方式建立 EAST 控制管理数据库,存储和管理以下几种重要信息:a.与每次放电有关的各控制系统预设的控制参数、用于反馈控制的过程数据和各时钟模块参

数设置; b. 控制子系统信息, 例如系统 IP、通讯端口号、预设参数名、触发通道号; c. 放电控制系统配置管理信息; d. 控制终端用户信息。

在整个放电阶段中央控制系统需要向子系统发送控制参数、触发脉冲和时钟信号等软硬件信号, 并且负责对子系统进行监控。参与实验的子系统可以依据功能和重要性分为关键型分控系统和辅助型分控系统。关键型分控系统是那些在整个放电实验期间都不可或缺的、起核心作用的子系统, 如极向场控制系统、密度控制系统等。辅助型分控系统是那些在实验中起辅助作用的系统, 辅助型分控系统的投入通常可以改善等离子体在某方面的特性, 因此操作员会根据当前的实验需要投入相关的辅助型系统。但对于放电监控程序来说, 每次放电前辅助型系统的个数和每个辅助型系统是否投入运行都是不确定的。为了保证软件通信的可靠性, 中央控制系统与各控制子系统都采用面向连接的 TCP 协议进行可靠通信, 任何一个子系统的连接失败都将导致监控程序的系统延时, 严重影响整个放电的进程。为了解决这一矛盾, 我们建立了放电监控系统配置管理信息数据库, 使用者可以通过带有图形界面控制终端, 选择需要加入本次实验的控制子系统, 放电控制系统和放电监控系统根据配置管理数据库中信息向加入到本次实验的系统提供软硬件信号和对子系统进行监控, 屏蔽对没有加入的辅助型分控系统的控制和监控, 提高了系统的灵活性和健壮性。

控制管理数据库集中存储和管理与每次放电有关的各控制系统预设的控制参数、用于反馈控制的过程数据和各时钟模块参数设置等重要运行参数, 并通过控制终端提供对各种重要历史数据的查询、重载等功能。

2.3 安全联锁与保护系统

EAST 全超导托卡马克装置的所有极向场线圈和纵场线圈均为超导磁体^[2]。而超导磁体即使在其设计的运行参数范围内运行, 在某些条件下也会发生失超, 特别是 EAST 纵场磁体和极向场磁体安装在同一外杜瓦内更易发生失超。如不加以保护, 不及时将磁体内储存的磁能泄放, 将会造成超导磁体或与其相关联的重要部件的损毁。EAST 运行须严格遵循运行规范。运行中, 外杜瓦和电流引线杜瓦的真空度必须达到要求; 纵场磁体按照深冷^[3]、慢

励磁^[4]、慢退出的最安全模式运行; 一旦系统磁体失超, 失超保护系统必须灵敏、可靠, 不能延时^[5]。

为了最大程度的避免风险、保证 EAST 装置安全和实验的顺利进行, EAST 需要建立一种有效的联动机制, 保护各个子系统, 避免或最大程度上的减少运行风险。针对这一目的我们建立了 EAST 安全巡检与联锁保护系统。EAST 安全和保护系统的主要任务是协调统一出现故障时中央控制系统和各分控系统的保护逻辑关系, 确定控制、特别是保护系统应对故障、风险的保护逻辑。图 3 为 EAST 联锁保护系统体系结构图。

EAST 系统的故障按照其危害等级划分为 3 类, 并且针对 3 种故障分别采取不同的保护措施。联锁保护系统负责巡检和分析各个控制子系统发送过来的巡检信号, 根据分析结果判断故障等级, 根据故障等级通知其他相关子系统采取相应的保护措施, 并把检测结果通知给安全联锁与保护系统。EAST 安全巡检系统可靠性和实时性有较高的要求, 巡检结果通过网络通讯通知安全联锁保护系统, 对人机界面没有很高的要求。根据这些特性, 我们选择了实时性和可靠性都比较高的 PLC 系统来实现 EAST 安全巡检系统。

2.4 中央定时系统与授时系统

为了协调和统一各个子系统, 建立了 EAST 时钟系统。EAST 时钟系统由中央定时系统和授时系统构成, 提供两种不同精度的时钟服务。中央定时系统为各个控制子系统提供统一的中央时钟和触发, 所有控制子系统使用中央时钟为基准时钟以实现各子系统间的协同工作。中央定时采用了分布式结构, 以单片机为核心组建了主节点, 由放电控制系统对其主节点进行控制。中央时钟节点采用 32MHz 高精度的时钟信号, 可实现微秒级分辨率^[6]。中央定时系统通过光纤将经过外围隔离驱动设备后的时钟和触发信号传输给各个子系统。连接到各个分布式节点的光缆长度一致, 可以确保到达各分布式节点的系统时钟和系统触发也是同步的。

EAST 中央控制系统不但建立了高精度的中央时钟系统来提供的时间同步, 还建立了秒级精度的中央授时系统提供基于网络的系统时间同步服务。建立 EAST 授时中心的主要目的是提供网络时间服务。EAST 授时服务器通过网络对 EAST 实验网络内的计算机系统的时间进行同步和校准, 统一工作

在EAST控制、采集网内的各个子系统的系统时间,为各系统的监控、测量、数据服务、日志服务等提

供必不可少的时间坐标系。

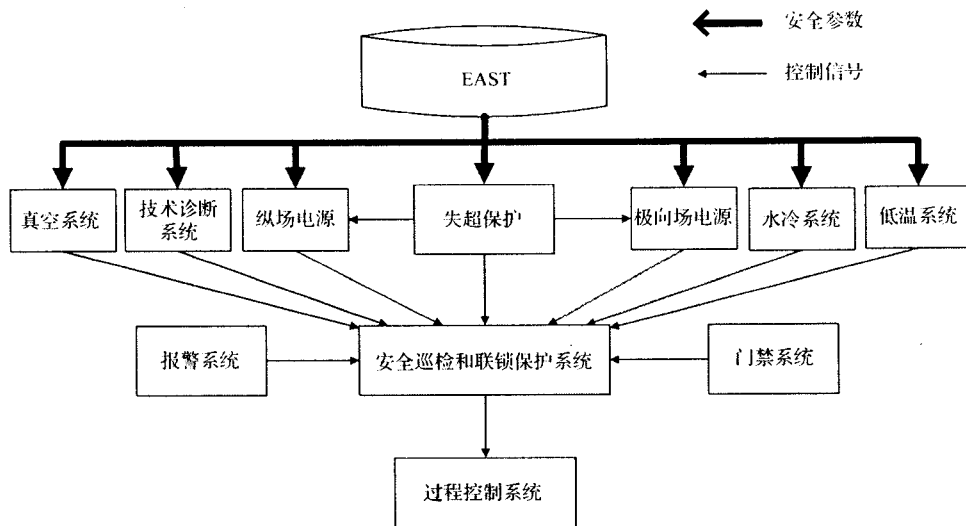


图3 EAST 联锁保护系统体系结构

通过基于网络的授时服务, EAST 系统的各个子系统的系统时间可以很容易的与授时中心服务器的实验标准时间保持秒级精度的一致, 实现各个子系统时间的统一。作为高精度的中央时钟系统的补充, 授时系统可以使各个子系统的系统时间保持秒级的同步, 满足一般级别的时间同步的需要。

EAST 授时系统采用 C/S 结构, 以授时服务器的时钟作为标准时间, 客户端的时间通过网络与服务器时间进行周期性校正。授时中心服务器监听特定的 TCP 端口, 由安装在各子系统计算机上的授时程序客户端定时向授时中心服务器发出较准时间的请求, 一旦建立连接, 授时中心服务器将时间信息以特定的形式发送给客户端, 并在发送完成后关闭连接。

2.5 控制终端

控制终端的主要功能是为用户提供使用简便的友好的图形化用户界面, 为各个控制、诊断子系统、硬件设备提供统一的参数设置接口。控制终端由位于控制室内的中央控制台和远程控制终端组成。

中央控制台位于 EAST 控制室内, 是 EAST 系统的主控终端。远程控制终端具有和中央控制台相同的控制功能和与中央控制台有相似的系统界面,

是为保持控制终端的统一性实现 EAST 远程控制和即时协作而建立的。用户可以通过远程登陆的方法使用控制终端。

中央控制台作为 EAST 的超级控制终端具有控制优先权和仲裁权, 远程控制请求会显示在控制台上, 得到允许后才获得控制权。控制台可以有权断开控制终端操作。在开放的远程合作平台中, 可能同时存在多个用户同时提交远程控制请求, 中央控制台应用同步机制裁判远程控制方案, 为系统提供一套安全可靠的运行方案。

3 EAST 虚拟合作实验室

作为 EAST 实验自身发展的重要补充, 即时协作平台可以看作是由研究者、先进的数据处理和计算机系统、高性能可视化工具和有效的信息传播工具等组成的国际合作平台。EAST 虚拟合作实验室主要由远程控制系统、远程数据服务系统、远程视频服务系统和即时通讯系统组成。EAST 虚拟合作实验室的主要目标就是建立基于互连网络环境的分布式应用平台, 以支持远程协同实验和信息交流, 实现在网络环境中开展 EAST 合作研究。远程控制系统的目标是围绕实验对象远程控制功能进行设计的功能服务。远程数据服务提供共享实验数

据、在线分析数据和实时显示实验过程数据的服务功能。远程视频服务系统是以视频会议系统为基架的信息服务平台,实现控制室信息的实时发布、远程合作者与本地参与者之间开展网络会议和学术讨论活动。

为了适应于系统未来的发展趋势, EAST 虚拟合作实验室都采用分布式的体系结构。系统采用 C/S 与 B/S 结构相结合,根据各子系统的实际情况灵活运用,实际开发中充分发挥 B/S 结构的灵活性与 C/S 结构的图形处理能力。

整个虚拟合作实验室的功能可以概括为协同实验和交流。协同实验的功能是使远程用户可以像本地用户一样,可以获取实验数据进行分析研究,并针对分析结果提交分析报告。信息交流的功能是指通过共享桌面、视频会议、即时通讯等方式的网络交流平台实现的。EAST 虚拟合作实验室主要由以下几部分构成:远程控制系统、远程数据接口和数据服务系统、EAST 即时通讯服务系统、EAST 视频服务系统。图 4 为 EAST 虚拟合作实验室的体系结构图。

4 总结

EAST 中央控制系统制定和规范了与各分控系统之间的通信协议,加强了对各分控系统的控制,统一和规范了控制数据的发布和控制参数的设置。系统按照功能模块设计和实施,有效地提高了系统的升级和扩展能力,能满足 EAST 现有工程实验需要,同时能适应未来实验进一步发展的各项需要,系统的控制力和灵活性大大提高。该系统已在 2006

年 8 月份以来的 EAST 装置上的多轮实验中得到应用,并且取得了良好的运行和控制效果。

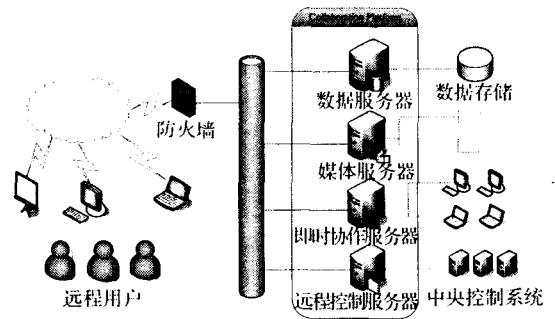


图 4 EAST 虚拟合作实验室体系结构

参考文献:

- [1] Luo J R. The design of the control system in the EAST tokamak [R]. The 4th General Scientific Assembly of Asia Plasma & Fusion Association on New Development of Plasma Physics and Fusion Technology, 2003 Oct.13-16, Hangzhou, China.
- [2] 孙晓阳, 罗家融, 季振山, 等. EAST 安全巡检与联锁保护系统设计及实现 [J]. 核技术, 2008, 31(4): 293-298.
- [3] Fu Peng. EAST pf coil & power supply [R]. The 4th General Scientific Assembly of Asia Plasma & Fusion Association (APFA), Hangzhou, 2003.
- [4] 陈灼民, 钱静, 龙凤, 等. 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): 93-95.
- [5] Bai Hongyu, Bi Yanfang, Wang Jingrong, et al. Design of 2kW/4K helium refrigerator for HT-7U [R]. The 4th General Scientific Assembly of Asia Plasma & Fusion Association (APFA), Hangzhou, 2003.
- [6] 吴一纯, 罗家融, 季振山, 等. 分布式实时模块在 EAST 托卡马克中央定时系统中的应用 [J]. 核技术, 2007, 20(9): 789-792.

Central control system for the EAST tokamak

SUN Xiao-yang¹, LUO Jia-rong^{1,2}, JI Zhen-shan¹, WU Yi-cun¹

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

2. School of Science, Donghua University, Shanghai 200051)

Abstract: The architecture, the main function and the design scheme of the central control system and the collaboration system of EAST tokamak are described. The main functions of the central control system are to supply a union control interface for all the control, diagnoses, and data acquisition (DAQ) subsystem and it is also designed to synchronize all those subsystem.

Key words: Central control; Collaboration; Database; Remote control; EAST superconducting tokamak