

EAST 托卡马克实时数据系统

李贵明¹, 罗家融^{1,2}, 刘英¹, 李实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: 全超导托卡马克装置 EAST 的设计目标之一是实现 1 000 s 的可控等离子体放电, 与此相对应, 需要构建具有实时数据传输、存储和发布的高速分布式实时数据系统。该文从功能结构和实现方法 2 个方面, 论述了 EAST 实时数据系统的硬件结构, 对基于时间片机制的实时数据系统接口和实现方法进行分析。

关键词: EAST 托卡马克; 分布式; 实时; 数据系统; 时间片

EAST Tokamak Real-time Data System

LI Gui-ming¹, LUO Jia-rong^{1,2}, LIU Ying¹, LI Shi¹

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031; 2. Donghua University, Shanghai 200051)

【Abstract】 One of the project missions of the whole superconducting tokamak EAST is the realization of 1 000 second plasma discharge. Correspondingly, it's necessary to construct a high speed distributed Real-Time Data System(RTDS) with the capacity of real-time data transmission, storage and distribution. This paper describes the hardware structure of the EAST RTDS from the aspects of function structure and realization method. Its interfaces and realization methods based on time slice mechanism are also analyzed at length.

【Key words】 EAST tokamak; distributed; real-time; data system; time slice

EAST 装置是我国完全自主建成的世界上第 1 个全超导托卡马克装置^[1], 围绕着 EAST 装置进行的物理实验诊断和测量更加丰富, 预计将会达到 2 000 路物理实验信号^[1]。因此, 基于离线(offline)方式的数据系统已经不能满足 EAST 的要求, 必须建立一套具有高可靠性、稳定性的实时数据系统(Real-Time Data System, RTDS)。

1 EAST RTDS 功能结构

EAST RTDS 结构如图 1 所示。

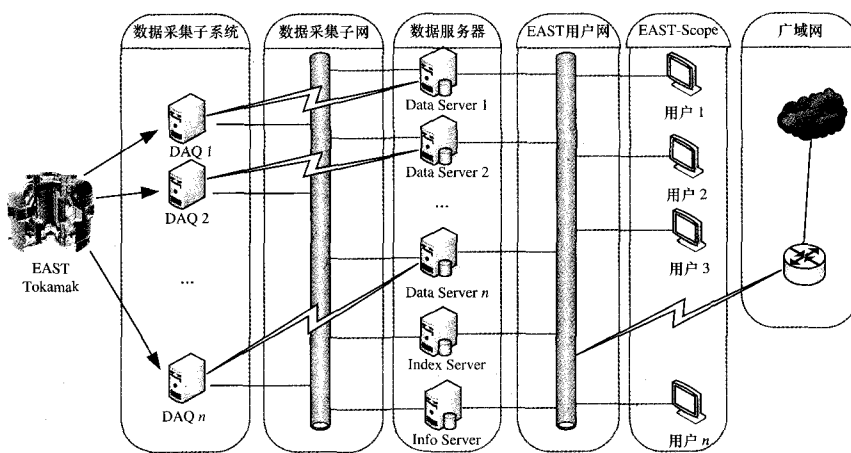


图 1 EAST RTDS 结构

分布式数据采集系统(Distributed Data System, DDS)在 HT-7 超导托卡马克装置上的成功应用为 EAST RTDS 的建立提供了借鉴。EAST RTDS 包括数据采集子系统、数据采集控制机、分布式数据服务系统以及 EAST-Scope 用户 4 个部分。各子系统之间通过千兆以太网连接, 进行控制参数和实验数据的传递和交互。

1.1 分布式数据采集子系统

由于 EAST 装置各测量和诊断系统物理信号的差异, 需要采用多种类型和参数(采样频率、采样时长、采集精度)的数据采集方式^[2]。因此, EAST 引入了基于不同操作系统和不同数据总线的分布式数据采集子系统(Distributed Data Acquisition Subsystem, DDAS), DDAS 是完全分布式的异构系统, 具有高度的扩展性和灵活性。

各子系统通过千兆以太网与数据采集控制机和数据服

务系统进行通信。每次放电开始前, 各采集子系统从数据采集控制机获取当前采集的参数信息, 采用统一的硬件中央定时系统进行数据采集, 确保各子系统间时序的完全同步。一次放电结束后, 各采集子系统将采集到的数据经过转换、处理和压缩(LZO)后, 通过网络传输到数据服务系统进行统一存储和管理。

1.2 数据采集控制机

数据采集控制机(Data Acquisition Control Subsystem, DACS)由参数设置、网络接口和数据库 3 部分组成: 实验人员通过参数设置对各采集子系统的通道参数(信号名称、单位、物理系数等)进行设

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

作者简介: 李贵明(1974—), 男, 博士研究生, 主研方向: 计算机数据采集与控制; 罗家融, 研究员、博士生导师; 刘英、李实, 博士研究生

收稿日期: 2007-12-24 **E-mail:** lgm@ipp.ac.cn

置并保存到数据库中;每次放电前,网络接口接收来自 EAST 总控系统的放电预设信息(包括放电炮号、预设等离子体电流长度等),转换成各采集子系统的相应采集参数(采样频率、采集时长),由网络接口通知各采集子系统按照对应的采集参数进行本次数据采集。

1.3 分布式数据服务系统(DDSS)

EAST 数据系统建立了完全分布式数据服务系统(Distributed Data Service System, DDSS)^[3]。目前,数据服务系统由一台数据索引服务器(index server)和多台数据存储服务器(data storage server)组成。数据存储服务器由多台在线(online)服务器和离线(offline)数据服务器组成。每台在线服务器对应数个数据采集子系统,负责对采集子系统的数据存储和发布。离线服务器目前包括 MDS-Plus 数据服务器和二级数据服务器。其中,MDS-Plus 数据服务器对在线服务器数据进行处理和转换后,存储为与世界各聚变实验室通用的 MDS-Plus 数据格式,便于国际间的交流与合作;二级数据服务器则将一些物理诊断的原始数据经过微分、积分等数学运算后,直接转换成具有真实物理意义的文件进行保存和发布。

采用分布式数据服务系统,可以充分利用各服务器资源,有效利用各服务器的网络带宽,极大地提高了数据服务系统的运行效率和数据吞吐能力。由于实验数据分布在多台数据服务器上,并且具有多种数据格式,为了方便终端用户的数据访问,在 EAST-Scope 用户和 DDSS 之间布置了一台数据索引服务器(index server)。索引服务器上建立了实验数据与各数据服务器相关信息(IP 地址、数据格式等)的对应关系表(index table),终端用户的所有数据请求均由实验数据分析系统 EAST-Scope 提交给索引服务器,索引服务器根据 index 表,将数据实际存储位置以及数据格式通知 EAST-Scope, EAST-Scope 根据返回的服务器信息到对应的服务器上获取实验数据,并按照其数据格式进行处理和分析。index server 建立以后,数据服务系统对于终端用户完全透明,极大地提高了数据服务系统的扩展性和灵活性。

2 EAST RTDS 实现

对于离线数据系统,实验数据只能在一次放电过程完全结束后才进行分析和处理。采用这种数据处理和发布系统,在等离子体电流长度小于 50 s 的短脉冲运行模式下,可以满足物理实验数据分析的需要。但是在长脉冲放电条件下,采用这种离线式数据系统,在等离子体放电过程中,无法获得当前实验状态和物理参数信息,从而无法对实验过程进行更加有效的控制。特别是 EAST 装置未来将进行 1 000 s 以上的长脉冲放电,这就要求 EAST 数据系统必须具备实时传输、存储和发布功能。

2.1 时间片机制

目前世界上各核聚变装置上均没有实时数据系统的成功经验,国外实验室进行数据分析和处理大多使用商业软件系统 MDS-Plus。MDS-Plus 也是基于离线方式的数据服务系统,无法适应 EAST 装置长脉冲运行模式的需要。

为了实现聚变装置数据系统的实时功能,各实验室都提出了“时间片”的概念^[4]:将一次等离子体放电过程按照固定的时间段 T_s 进行划分,数据系统按照 T_s 进行数据的存储和发布。如对于一次 300 s 的放电过程,数据系统按照 $T_s=5$ s 的时间片为周期进行循环,采集系统完成一次 5 s 的数据采集以后,在继续进行下一个 5 s 采集过程的同时,将前 5 s 采

集得到的数据通过高速网络传送到数据服务系统各对应的服务器中。数据服务器将接收到的数据一方面通过网络广播的形式,将最新数据发布到 EAST 用户网,另一方面数据服务器对数据进行一定的处理和压缩,按照一定的文件格式保存到磁盘中。数据服务系统就能在每隔 5 s 的时间片内,获得最近 5 s 的实验数据。通过编写特殊的数据访问协议,实现 EAST-Scope 用户对实验过程中物理数据的实时访问和分析。

基于时间片机制的实时数据系统的实现,需要各采集子系统具有实时数据采集和处理的能力。对于数据服务系统,需要根据时间片保存来自采集子系统的原始数据以及响应 EAST-Scope 用户的网络数据请求。数据服务系统数据存储格式和访问协议的设计对 EAST 实时数据系统的性能和稳定性至关重要。

2.2 数据接口设计

2.2.1 时间片数据实时存储和接口

为了实现基于时间片的实时数据系统,需要对数据系统接口进行更深入的研究和分析。EAST 一次等离子体放电过程预计将持续 1 000 s 以上,按照 EAST 物理诊断系统的要求,数据采集系统的频率范围从 10 kHz~10 MHz 之间。对于超过 1 MHz 采样频率的数据采集,由于数据量过于庞大,不能按照时间片划分的机制实现实时数据存储和发布的功能,对于这些高速的数据采集,只能采用离线的数据存储和发布方式。

对于相对低速的数据采集(10 kHz~1 MHz),在未来 EAST 装置上将会有各类诊断信号近 1 000 路(channels),其中,1 MHz 的高速数据采集通道约 50 路,按照最高 16 bit 数据采集精度计算,一次 1 000 s 放电的数据量最大约为 100 GB。以 5 s 的时间片划分,每个时间片的数据量为 500 MB,按照采用 10 台数据服务器的数据系统发展规划,每台服务器的数据负荷为 50 MB/5 s,采用千兆高速交换网络以及高速数据存储系统(4 Gb/s),完全可以满足时间片内的数据传输和存储的要求。

在 EAST 装置数据系统中,由于一次放电的数据量庞大,需要采用无损压缩算法对原始数据进行处理。目前 EAST 数据系统上采用的是开放源码的 LZ0 压缩算法,该压缩算法的特点是具有较高的解压缩速度和低内存占用率。经过测试,对于一台 P4-2.4 GHz,内存 512 MB 的计算机,其平均解压缩速度可达 50 MB/s,而压缩速度为 5 MB/s^[4]。

对于离线方式的数据系统,所有的数据是在一次放电结束后,由前端数据采集机压缩后传输到数据服务器。而采用时间片机制的实时数据系统以后,由于每台数据采集机在一个时间片的数据量远大于 25 MB,无法采用实时压缩的方式,前端数据采集机只能将原始的未压缩数据在一次时间片采集过程完成后直接通过网络传送到数据服务器中。数据服务器接收到每个时间片的原始数据以后,通过 UDP 广播的方式,向局域网 EAST-Scope 用户提供数据。

在放电过程中,所有服务器对接收到的原始数据不进行压缩,直接将时间片数据存储到临时文件中,存储格式为每个时间片一个文件,临时文件的命名规则为前端采集机 ID_时间片序号,文件内容包括头区和数据区 2 个部分,如图 2 所示。

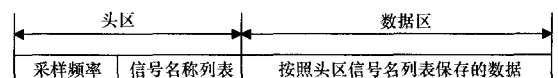


图 2 时间片临时数据格式

2.2.2 数据压缩和存储

EAST RTDS 上各采集机直接将原始数据按照时间片发送到对应的数据服务器,数据服务器通过数据接收进程 TRANS 按照时间片进行临时数据存储,为了提高服务器的运行效率,在服务器上同时运行数据压缩进程 COMPS,TRANS 接收到一个时间片数据后,发送消息通知 COMPS 进行本次数据压缩过程。由于 LZ0 压缩算法目前的压缩速度为 5 MB/s^[4],而一台服务器每个时间片的数据量为 500 MB 左右,因此 COMPS 需要采用队列机制完成一次放电所有数据的压缩过程。

COMPS 对每个时间片的数据进行整体压缩以后,需要对各时间片的压缩数据按照一定的格式进行最后的数据存储,而存储方式的选择以及接口设计,对离线用户数据访问的效率至关重要。在 1 000 s 的放电情况下,一个 1 MHz 数据采集的通道原始数据量为 2 GB。目前 LZ0 算法的压缩比为 2.5:1 左右,压缩后的数据量约为 1 GB。在 EAST 实验环境下,离线方式下用户一次可能请求多道实验数据,如果采用将用户请求的数据一次全部发送至用户计算机的方式,将对数据服务器、EAST 局域网以及用户计算机带来极大的负担。为了减轻各系统的负担,离线数据访问接口也采用时间片划分的机制,并结合 MDS-Plus 数据存储技术进行设计。COMPS 压缩后的数据存储包括通道信息、时间片数据存储位置和采集参数信息以及通道压缩数据 3 个部分,分别保存在 3 个文件中。

各文件存储格式如图 3 所示。

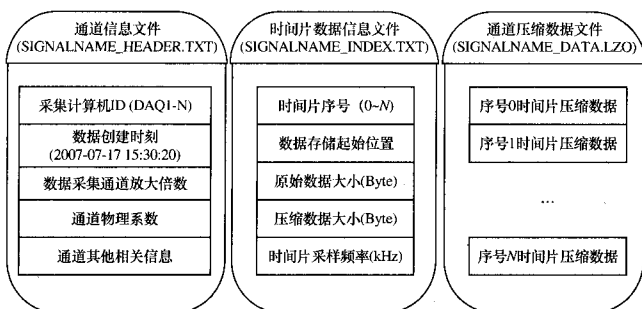


图 3 离线数据存储

2.2.3 离线数据接口设计

EAST 实时数据系统与 EAST-Scope 用户的离线数据接口设计同样基于时间片机制。在数据系统各服务器上,运行了数据接口程序 GATE,其功能是实现服务器与 EAST-Scope 用户的数据交互。用户请求一次放电某个时段(时间片长度的整数倍)的数据时,GATE 首先通过检索数据头区文件 SIGNALNAME_HEADER 和索引文件 SIGNALNAME_INDEX 获得信号通道对应时段的数据存储位置、采样频率等相关信息,然后对数据文件 SIGNALNAME_DATA 进行定位和数据访问,将压缩数据通过网络接口提交给 EAST-Scope 用户。采用基于时间片的离线数据访问方式,可以极大地降低数据系统服务器的负担,减少突发网络数据流量,从而有效提高 EAST RTDS 的性能和稳定性。

3 结束语

EAST 装置 1 000 s 的长脉冲运行参数对 EAST 数据系统设计提出了实时性的要求。EAST 数据系统将实验过程划分为不同的时间片,由数据服务器对各数据采集子系统的数据进行实时压缩和处理。在此基础上,设计一个高速、高可靠性的实时数据接口,为物理实验人员提供不同精度的实时数据服务。

参考文献

- [1] Luo Jiarong, Wang Huazhong. The Distributed Control and Data System in HT-7 Tokamak[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(2): 496-500.
- [2] Luo Jiarong, Zhu Lin, Wang Huazhong, et al. Towards Steady-state Operational Design for the Data and PF Control Systems of the HT-7U[J]. Nuclear Fusion, 2003, 43(9): 862-869.
- [3] Li Guiming, Luo Jiarong, Zhu Lin, et al. The Design of the Data System in the EAST Tokamak[C]//Proc. of the 4th General Scientific Assembly of Asia Plasma & Fusion Association on New Development of Plasma Physics and Fusion Technology. Hangzhou, China: [s. n.], 2003: 13-16.
- [4] Liu Ying, Luo Jiarong, Li Guiming, et al. The EAST Distributed Data System[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(4): 339-343.

(上接第 14 页)

显的偏离群数据的检测问题。通过实验结果的对比分析,可以证明该方法比引言中所列出的常规方法能更快地完成对大容量数值型数据的清洗,并在实际项目中取得了良好的效果。

参考文献

- [1] Bao Yubin. A Human-centered Process Model for Data Cleansing under Data Warehousing[J]. Computer Science, 2004, 31(5): 52-55.
- [2] Wolf W. A Visual Search System for Video and Image Databases[C]//Proc. of ICMCS'97. Ottawa, Canada: [s. n.], 1997: 517-524.

- [3] 王建州, 马志新, 李 廉. 基于混沌的异常数据的动态识别和挖掘[J]. 清华大学学报, 2005, 45(1): 1753-1756.
- [4] 蔡菲娜. 基于聚类分析的数字滤波阈值算法[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(2): 234-238.
- [5] Vassiliadis P, Simitsis A, Skiadopoulos S. Conceptual Modeling for ETL Processes[M]. [S. l.]: ACM Press, 2002.
- [6] 沈恒范. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 154-159.
- [7] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. [S. l.]: Addison Wesley Publishing, 1989.