

基于 EPICS 的 EAST 极向场电源 监控设计与实现

王广红, 何诗英, 高 格, 傅 鹏, 黄连生

(中国科学院 合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 监控系统是 EAST 极向场电源控制系统重要的子系统, 实现对设备的实时监视与远程控制; 电源监控系统运行于 Linux 操作系统, 基于 EPICS 进行设计; 创建 EPICS 数据库, 编写 IOC 程序, 使用 CSS 设计 OPI 人机界面; 实现对现场所有设备的实时监视, 并对开关进行远程控制, 使用 alarm 插件实现故障检测, 使用 archive 插件实现数据存储并可查看历史数据; 经实验测试, 该设计运行稳定功能齐全, 能满足极向场电源对监控系统的需求。

关键词: EAST 极向场电源; 监控系统; EPICS; 实时监视; 实时控制

Design and Implementation of Monitor System Based on EPICS for EAST PF Power Supply Control System

Wang Guanghong, He Shiyong, Gao Ge, Fu Peng, Shen Jun, Huang Liansheng
(Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Monitor system is an important subsystem of EAST (Experimental Advanced Super-conducting Tokamak) poloidal field power supply control system, implements real-time monitoring and remote control. Monitor system is running on Linux operating system, based on EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System). Create EPICS database and IOC program, design OPI (Operation Interface) using CSS (Control System Studio). Realize real-time monitoring for all devices, control switch remotely, check and display fault signal using alarm plugin, store all input data by archive plugin, and can check history data at any time. The experiment shows that this design is stable and fully functional, and can meet the requirement of poloidal field power system.

Keywords: EAST (experimental advanced super-conducting tokamak) PF power supply; monitor system; EPICS; real-time monitoring; remote control

0 引言

极向场电源系统 (PF) 作为托卡马克装置的核心子系统之一, 由 12 组独立可调的 PF 电源分别向 14 组相互耦合的极向场超导线圈供电, 每一套 PF 电源主要包括 AC-DC 整流器 (converter unit, CU)、晶闸管开关网络 (switch network unit, SNU)、失超保护系统 (quench protection, QP) 和隔离开关 (disconnect switch, DS)^[1-3]。任何设备的状态都需要实时监视, 同时开关设备分布在不同的地方, 所以需要能够进行远程控制。

随着 PF 控制系统硬件升级, 所有的软件也进行了升级或重新设计。以前的监控系统运行于 Windows 操作系统, 通过力控软件设计, 力控软件需要付费, 维护和升级不方便^[4]。升级后的监控系统运行于 LINUX 系统, 基于 EPICS (experimental physics and industrial control system) 进行设计。EPICS 是开源控制软件工具包, 应用领域非常广泛, 比如光源、功能物理、天文望远镜等, 通过世界性的用户群体来维护与发展。EPICS 提供很多标准工具供用户使用, 这样就减少了接口代码的编写工作, 确保统一的标准接口。EPICS 是分布式系统, 如图 1 所示, 每一个客户端 (operation interface, OPI)

都可以看到所有的服务端 (input/output controller, IOC)。可以很方便地使用 EPICS 创建一个控制系统, 在该系统中, 所有服务端 IOC 中定义的 PVs (process variables) 都可以通过 CA (channel access) 宏被客户端 OPI 随意地访问^[5]。服务端 IOC 实现输入输出操作, 包括数据库、状态机、设备支持、硬件驱动等, 数据库对所有的记录进行定义并设置, 设备支持中对所有的 PV 状态进行更新或者获取 PV 数值, 与硬件相关的程序可以做成硬件驱动, 以供直接调用。本文使用 CSS (control system studio) 作为 OPI 人机界面, CSS 是基于 eclipse 的插件系统工具包, 使用 CSS 实现所有设备的状态监视以及开关控制, 同时用户可以安装自己所需插件, 本文使用报警插件 alarm 与数据归档插件 archive。服务端与客户端之间通过 CA 协议进行数据交互, CA 协议是 EPICS 特有的一种透明的通信方式。

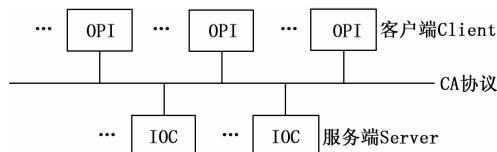


图 1 EPICS 基本框架

收稿日期: 2017-11-30; 修回日期: 2017-12-27。

作者简介: 王广红 (1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电源控制器方向的研究。

1 监控系统设计

升级后的监控系统如图 2 所示。包括数据传输层、服务器

层与人机接口层。数据传输层是现场设备与 IOC 程序的接口，现场设备主要包括整流器、晶闸管、失超保护、隔离开关，以及辅助设备水路、传感器、急停、烟雾报警检测等，一套电源传输的主要信号如图中所示。服务器层包括 IOC 服务器、archive 数据归档服务器和 alarm 报警服务器，IOC 服务器中数据库对用到的所有 PV 进行定义并设置，设备支持通过 Modbus UDP 协议与现场总线控制器进行数据交互，将设备状态、开关状态、电流、电压、水压信号等上传至人机界面进行显示，实现实时监视，并获取开关控制 PV 数值，处理后发送至现场总线控制器，实现对开关的远程控制。Archive 归档系统搭建完成后，将需要归档的 PV 导入关系数据库，并启动归档服务器，即可以将每个 PV 的所有数据存入关系数据库。Alarm 报警系统搭建完成后，将携带 PV 名字的配置信息导入关系数据库，并启动报警服务器，当 PV 状态与报警严重度发生变化时，服务器检测此变化，并通知 CSS 界面进行更新。人机界面包括所有设备的状态监视、开关控制、报警检测以及历史数据查询，为了能够在 CSS 中能够实现报警检测和历史数据查询，首先将 alarm 和 archive 插件插入 CSS 之中，然后打开报警视图查看报警，打开数据浏览视图从归档系统中调取历史数据进行波形显示。

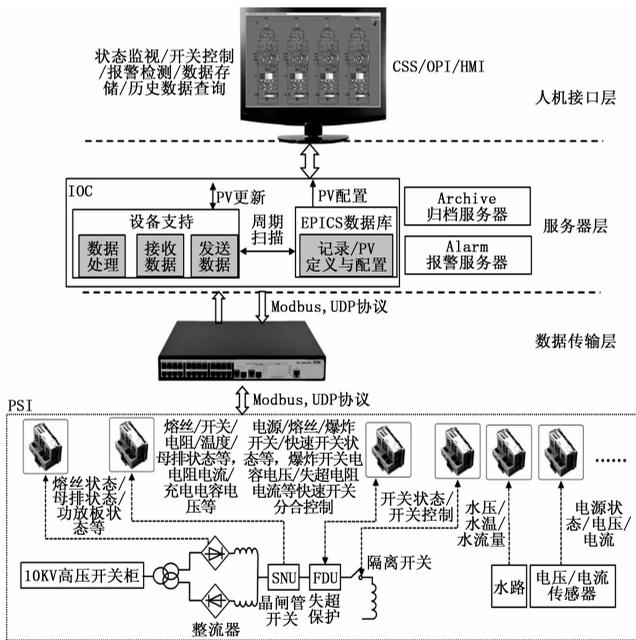


图 2 监控系统框图

2 数据传输

本文使用现场总线作为设备和 EPICS IOC 的数据传输媒介，使用的现场总线控制器型号为 WAGO750-881^[6]，现场总线模块包括 WAGO750-479 (AI, Analog Input), WAGO750-400 (DI, Digital Input) 和 WAGO750-513 (DO, Digital Output)。IOC 与现场总线控制器的通信协议为 Modbus UDP，其信息帧格式如图 3 所示，包括头部与数据区域。头部的功能代码 (Function code) 非常重要，其决定着将会执行何种功能，读模拟信号、读数字信号还是写入数据等。数据区域包括数据长度与实际数据等。定时器线程以 100 ms 周期向现

场总线控制器发送读取模拟/数字信号请求，控制器搜集所需数据并返回数据给 IOC 的接收线程，接收线程阻塞式等待接收数据，接收到数据包后对其进行分析处理。发送线程检测到开关控制信号与当前状态不一致时，发送数据到对应现场总线控制器，控制器按位将信号分配给输出模块，实现对开关的控制。

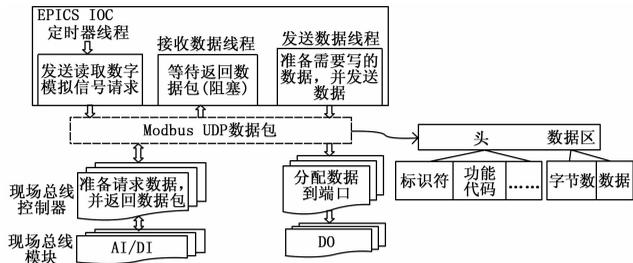


图 3 数据传输过程

以读数字信号 (DI) 为例，其读请求信息帧如图 4 (a) 所示。功能代码为 0x01，所请求的数据长度为 8 位。返回数据包的功能代码也应为 0x01，返回一个字节的的数据 0x75。接收线程接收到返回数据包后，取出数据包携带的 IP 信息，从而判断数据来自哪个设备，再根据返回包的功能代码判断是模拟信号或数字信号，若为数字信号，则逐位取出信号，并在设备支持中赋值给对应 PV，若为模拟信号，则一个模拟信号占用 2 个字节。

字节	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
描述	Transaction identifier	Protocol identifier	Length field	Unit identifier	Function code	Reference number	数据					Bit count
例子	0x0000	0x0000	0x0006	0x01	0x01	0x0000						0x0008

(a) 读 DI 数据请求包

字节	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
描述	Transaction Identifier	Protocol identifier	Length field	Unit identifier	Function code	Byte count	数据			
示例	0x0000	0x0000	0x0006	0x01	0x01	0x01	0x75			

(b) 返回数据包

图 4 读 DI 数据请求信息帧与返回包格式

3 IOC 程序设计

3.1 数据库设计

EPICS 数据库就是各种类型记录 (Record) 的集合。一个记录拥有唯一的名字和类型，有很多的域，一个或者多个设备支持，可以有多个链接。当记录被处理时，它可以从硬件或者其它记录获取数据，可以将数据放到硬件或者其它记录，可以将原始数据转换为工程数据，检测数值是否超出范围并引起报警等。监控系统 EPICS 数据库定义约 1200 条记录，图 5 是本文定义的一个记录，包括记录名称、类型、属性、链接、数值等。PV 是用于 EPICS 客户端与服务端数据交换的变量。PV 名字是由记录名字 (Record name) 和域 (Field) 组成的，比如图中定义的记录，其 PV 名字可以描述为 EAST-monitor-PF01: CU1_Pressure_L. DESC、EAST-monitor-PF01: CU1_Pressure_L. DTYP、EAST-monitor-PF01: CU1_Pressure_L. SCAN 等，记录名字作为 PV 名字时默认为 VAL，即 EAST-monitor-PF01: CU1_Pressure_L 等同于

T—monitor—PF01: CU1 _ Pressure _ L. VAL.

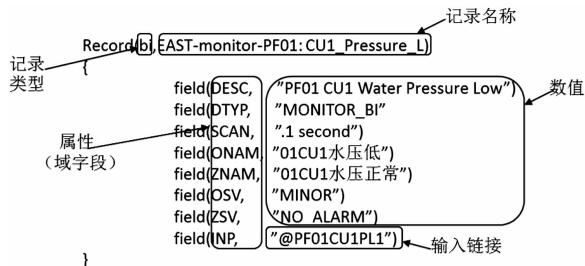


图 5 记录定义

本文使用的记录类型包括 ai (模拟输入)、bi (数字输入) 和 bo (数字输出)。通过域来设置记录的行为或者属性, 比如记录如何被执行, 数据从哪里获取或者送到哪里去, 何时进行报警等。域分为用于设计的域和用于运行的域, 设计域供设计者定义数据库时设置记录行为。当 IOC 运行后, 可以通过运行域查询记录执行情况, 比如 PACT 域表示记录是否正在被处理, SEVR 是报警严重度数值, STAT 是报警状态, TPRO 域设置为 1 时可以跟踪记录执行情况。如表 1 所示为本文用到的设计域。SCAN 为记录扫描机制, 决定设备支持如何被执行, 包括周期性、中断触发或者事件触发, 本文都使用周期扫描机制, 即记录对应的设备支持周期性执行, PV 数值周期性更新或被获取。OSV 和 ZSV 用于 alarm 报警, 若 OSV 设置为 Minor 或者 Major, ZSV 设置为 OK, 则当 PV 数值为 1 时触发报警, 相反 PV 数值为 0 时触发报警。隔离开关 DS 与快速开关 DCCB (Direct Current Circuit Breaker) 的分合控制需要脉冲信号, 本文使用 HIGH 域实现, HIGH 是 bo 记录的特有域。比如 EAST—monitor—PF01: DISDS1 _ close _ comm 用于控制电源 PF01 的隔离开关 DS1 的合动作, 其扫描周期 SCAN 设置为 0.3 s, HIGH 设置为 0.2 s, HIGH 的数值必须不大于扫描周期, 当界面向该 PV 写入数值 1 时, 数值 1 保持 0.2 s, 之后恢复到数值 0, 以此模拟 200 ms 脉宽的脉冲信号。

表 1 本文使用的设计域

Fields	Description
DESC	记录描述
DTYP	设备类型, 是连接记录和设备支持的桥梁。
INP	输入链接, 本系统用其数值区分不同记录。
SCAN	扫描机制, 本文使用周期扫描, 记录对应的设备支持按照设置周期性执行。
ONAM	用于 bi 记录, 数值 1 对应的字符串。
ZNAM	用于 bi 记录, 数值 0 对应的字符串。
OSV	用于 bi 记录, 数值 1 代表的严重度, 用于 alarm 报警, 严重度等级分为 Major、Minor 与 OK。
ZSV	用于 bi 记录, 数值 0 代表的严重度, 用于 alarm 报警, 严重度等级分为 Major、Minor 与 OK。
EGU	用于 ai 记录, 工程单位。
PREC	用于 ai 记录, 精度。
HIGH	用于 bo 记录, 高电平保持的时间, 单位为秒。

3.2 EPICS IOC 设计

IOC 程序包括定时器线程、接收数据线程、发送数据线

程、bi 设备支持、ai 设备支持与 bo 设备支持。对于输入信号, 接收线程接收到数据后, 进行分析取出操作, 设备支持将数值赋值给对应 PV, 人机界面相应更新。对于输出信号, 操作人员在界面上对开关进行操作, 设备支持不断获取当前 PV 数值, 并判断其数值是否变化, 若变化则通知发送线程发送控制信号到现场总线控制器。设备支持是一组记录支持调用的例程, 可以与硬件进行数据交互, 是 IOC 与硬件的接口。记录的的设备类型是由域 DTYP 进行设置的, 而该域由用户自己设定。本文自定义 3 种类型的设备类型 DTYP, MONITOR _ BI, MONITOR _ AI 与 MONITOR _ BO。MONITOR _ BI 处理所有的 bi 记录, MONITOR _ AI 处理所有的 ai 记录, 都使用周期性扫描机制, 扫描周期为 100 ms。MONITOR _ BO 处理所有的 bo 记录, 扫描周期为 300 ms。图 6 为本文一个记录的设备支持实现过程。首先在 EPICS 数据库中定义记录, 对记录行为 INP 与 DTYP 进行设置, 然后在设备支持的申明文件 (DBD) 中找到对应的 DTYP, 从而获得其入口表的地址 MonitorTestai, 根据地址在设备支持程序中找到对应的设备支持函数, 从而实现对记录的处理。设备支持中的初始化函数 init _ record 只在 EPICS IOC 程序启动时执行一次, 记录处理函数 read _ ai 的执行根据 SCAN 域的设置周期性执行。read _ ai 函数中根据 INP 判断当前被触发的是哪个 PV, 然后将接收线程分析处理后的对应数据赋值给当前 PV。

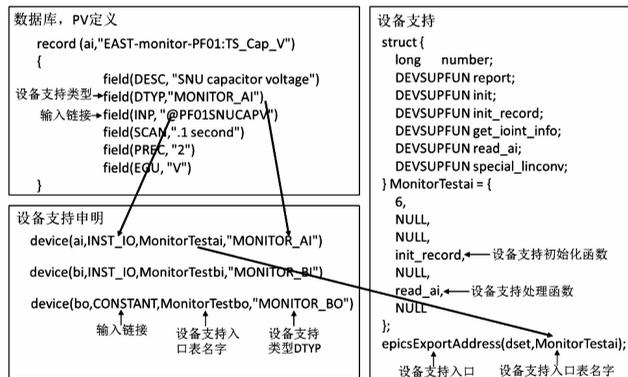


图 6 AI 设备支持实现过程

4 界面设计

4.1 状态实时监视与开关远程控制

EPICS IOC 设备支持程序中对所有 PV 进行状态更新, PV 状态在 OPI 界面上进行显示, 包括电源主回路、所有开关与水路状态等, 用于显示状态的主要控件包括编辑框、图片等, 通过编辑框显示模拟信号数值, 通过图片颜色或者亮度的变化显示当前信号状态或者运行状态的变化。OPI 界面上对开关进行闭合或者打开的操作, 实现对隔离开关 DS 与快速开关 DCCB 的远程控制。每一套电源有 3 个隔离开关 DS1、DS2、DS3, 3 个开关硬件互锁, DS1 与 DS2 同时进行控制, 当 DS1 与 DS2 闭合时, DS3 不能闭合, 否则会造成电源短路, 为了保证设备安全, 防止硬件互锁失败, 软件也进行互锁设计。根据调试需求, 12 套电源的隔离开关可以一起控制, 也可以独立控制。当界面对某个隔离开关进行分合操作时, 对应 PV 被强制赋值 1, IOC 程序检测到控制信号与当前开关状态数值不同, 则向隔离开关现场总线控制器发送控制信号。

