

基于实时 Linux 的极向场电源主控制系统的设计

何诗英, 黄连生, 高 格, 沈 君, 王广红

(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: 为了满足极向场电源控制系统严苛的实时响应的要求, 选择实时 Linux 系统作为系统平台, 采用一个开放源代码的、基于 C/C++ 的 Eclipse 可扩展的开发平台作为开发工具, 完成极向场电源主控制系统的设计, 实现了在一个控制周期内(1ms)对极向场电源系统的 12 套本地控制器的实时通信和实时控制。对极向场电源主控制系统的高速通信和实时控制、稳定可靠等关键问题给出了可行的实践性的解决方法。经实验测试, 该设计运行稳定, 能满足极向场电源控制系统的实时需求。

关键词: 极向场电源; 主控制器; 实时 Linux; 定时器; 实时控制; 高速通信

中图分类号: TM399

文献标志码: A

1 引言

热核聚变实验装置(EAST)是国家“九五”重大科学工程, 是世界上第一个同时具有全超导磁体和灵活的冷却结构的超导托卡马克装置。其目的是探讨和平利用核聚变的可能性, 以最终解决能源问题。极向场电源系统是托卡马克的主要子系统之一, 它为等离子体的产生、约束、维持、加热以及等离子体的电流、位置、形状、分布和破裂的控制, 提供必要的工程基础和控制手段。对装置运行的性能与安全, 物理实验的成败与效率, 有着至关重要的作用; 其实时性、可靠性、可扩充性要求甚高。

EAST 超导托卡马克装置上均匀分布着 14 个极向场线圈, 由极向场电源系统实现对 14 组超导线圈的供电。极向场电源系统是由 12 套相互独立的电源组成的, 每套相对独立的电源都有各自独立的硬件系统组成; 由 12 套本地控制器独立管理和控制对应的极向场电源设备系统, 由极向场电源主

控制系统实现统一管理和控制。极向场电源主控制系统是极向场电源控制系统的核心, 其主要功能是管理及汇总 12 套本地控制器的状态, 分配电源参考电压; 实现和 EAST 总体控制系统的极向场电源控制参数的实时传递, 时序状态转换, 以及安全连锁; 本地调试模式下可以实现对变流器的实时控制。

2 极向场电源主控制系统的构建

图 1 给出了极向场电源主控制系统的体系结构, 极向场电源主控制系统涉及到 5 个各自独立的网络: EAST 中央控制网络, 等离子体控制系统(PCS)反射内存网络, 极向场电源系统的核心控制网络, 设备监控网络和数据采集网络, 主控制器是其核心控制计算机。主控制系统的功能: 实现和 EAST 实验总体控制系统的数据传输和交互, 包括极向场电源控制参数, 等离子体放电时序控制和安全连锁; 实现和极向场电源系统的设备监控网络的数据传

收稿日期: 2016-09-27; 修订日期: 2017-08-14

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2008GB104000); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)

作者简介: 何诗英(1972-), 女, 安徽省芜湖县人, 高级工程师, 主要从事磁体电源控制系统的研发工作。

输和交互,包括收集极向场电源系统的安全连锁现场总线控制器的安全状态信号,以及 12 套极向场电源的状态信号等,并发布到设备监控网络由操作节点进行数据处理;实现将 12 套极向场电源的控制参数实时发布至数据采集网络,以备事后查看和分析。

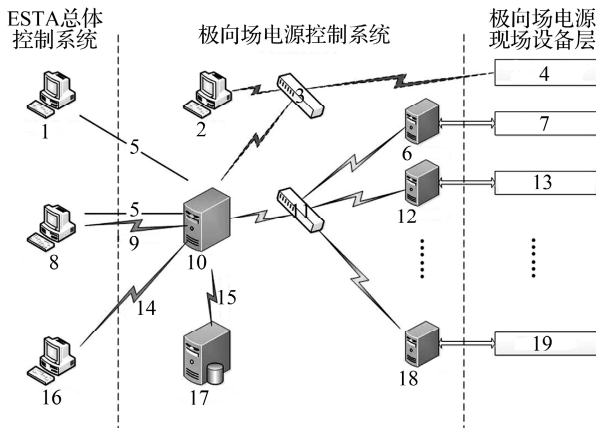


图 1 EAST 极向场电源主控制系统的架构图

1——安全连锁系统; 2——操作节点; 3——设备监控网络; 4——极向场电源安全连锁现场总线控制器; 5——光纤; 6——本地控制器 1; 7——极向场电源 1; 8——中央控制系统; 9——中央控制网络; 10——主控制器; 11——核心控制网络; 12——本地控制器 2; 13——极向场电源 2; 14——反射内存网络; 15——数据采集网络; 16——PCS 控制系统; 17——数据库服务器; 18——本地控制器 12; 19——极向场电源 12。

根据极向场电源系统的控制要求,主控制器的控制周期为 1ms,满足硬实时和软实时共存。对于 12 套本地控制器的实时通信,逻辑和时序控制来说是硬实时系统,而对于收集安全连锁信号和极向场电源系统状态信号并发布至设备监控网络来说是软实时的。显然,主控制器设计的重点是如何满足硬实时部分在一个控制周期内完成和每套本地控制器的信号接收、运算、通信、执行、数据备份等,而且还应该保证各套本地控制器之间有比较好的同步性。

综上所述,极向场电源主控制器选择实时 Linux 作为系统运行平台,采用一个开放源代码的、基于 C/C++ 的 Eclipse 可扩展的开发平台作为开发工具来实现的。

3 极向场电源主控制器的设计

3.1 操作系统平台

实时操作系统(RTOS)是指当外界事件或数据产生时,能够接受并以足够快的速度予以处理,其处理的结果又能在规定的时间之内来控制生产过程或对处理系统作出快速响应,并控制所有实时任务协调一致运行的操作系统。因而,提供及时响应和高可靠性是其主要特点。实时操作系统有硬实时和软实时之分,硬实时要求在规定的时间内必须完成操作,这是在操作系统设计时保证的;软实时则只要按照任务的优先级,尽可能快地完成操作即可。我们通常使用的操作系统在经过一定改变之后就可以变成实时操作系统。实时操作系统是保证在一定时间限制内完成特定功能的操作系统。

主控制器选用实时 Linux 作为其系统平台。如图 2 所示,采用的实时 Linux 系统是在正常内核之外生成了一个实时内核,通过实时抢占补丁(PREEMPT_RT 补丁)实现硬实时,实现内核互斥的优先级继承,并把中断处理程序转换为内核线程以实现线程可抢占。实时内核将普通 Linux 系统作为一个该操作系统中的一个低优先级的任务来运行;实时内核的高精度定时器,允许定时器以 1μs 的精度。

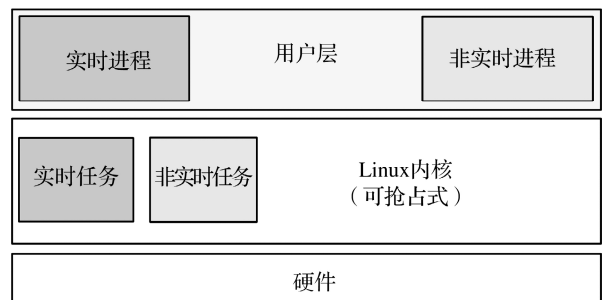


图 2 Linux 实时内核

3.2 定时器

根据极向场电源的特性,主控制器控制周期设定为 1ms,因此定时器的设计是维持主控制器控制周期的关键,其可靠性、稳定性和实时性要求非常

高。设计思路：启动一个基本定时单元模块循环计时，有定时需求的其他进程作为任务挂载到定时单元模块上，到达任务所需的定时时间后，基本定时单元将以信号量的方式通知任务。使用的定时函数有：创建定时器函数 `timer_create()`，设定定时函数 `timer_settime()` 和取出本次触发时刻函数 `clock_gettime()`。如图 3 所示，从图 3a 可以看出 1ms 的误差范围为 50 μ s 左右；图 3b 为挂载 16 个任务，CPU 负载为 75% 时 1ms 定时测试结果，可以看出定时精度受负载影响很小。

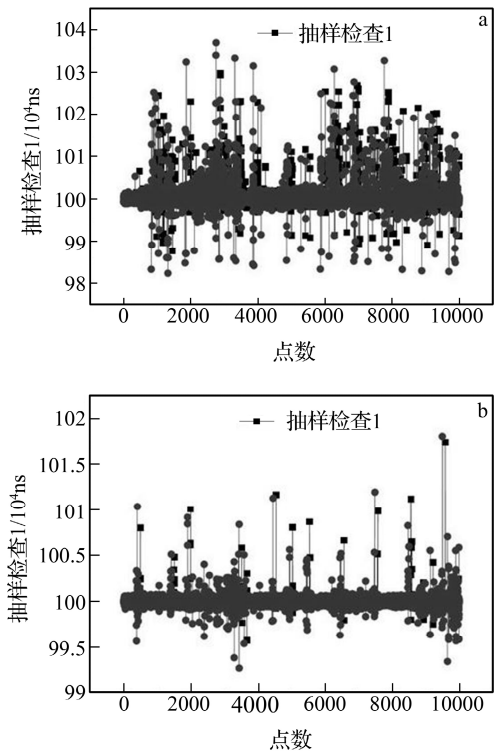


图 3 1ms 定时器测试
a——无负载；b——75%负载。

3.3 实时数据的高速通信

主控制器传递的实时数据主要是极向场电源控制参数的传递和时序逻辑控制信号的传递。如图 4 所示，极向场电源控制参数的传递包括 2 个部分：通过 EAST 总体控制系统发送的极向场电源系统的控制参数；通过极向场电源系统的核心控制网络广播 12 套极向场电源的控制参数。根据核聚变装置

实验的要求，极向场电源控制参数从 PCS 控制系统发出到本地控制器的接收时间必须小于 0.5ms。

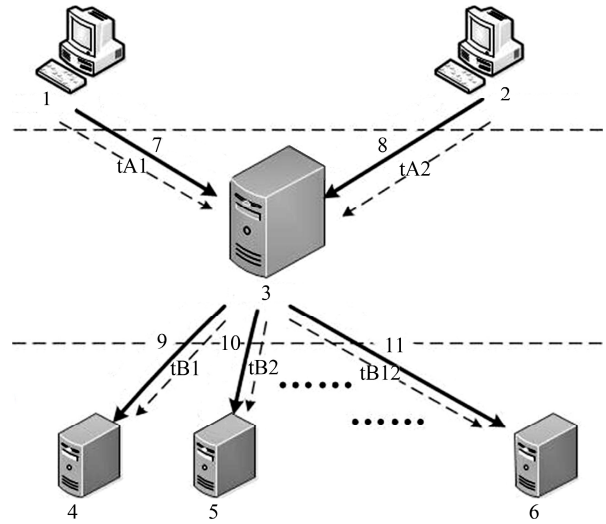


图 4 主控制器实时控制参数传递示意图

1——PCS 控制系统；2——中央控制系统；3——主控制器；4——本地控制器 1；5——本地控制器 2；6——本地控制器 12；7——极向场电源参考电压；8——时序逻辑控制信号；9~11——极向场电源控制参数。

从中央控制系统发送的时序逻辑控制信号是电平信号，通过光纤传输的，传输距离小于 100m，传输时间基本可以忽略。从 PCS 控制系统发送的 12 套极向场电源参考电压，浮点数据类型共 48 个字节，其传输延迟小于 4.7 μ s，如图 5 所示。

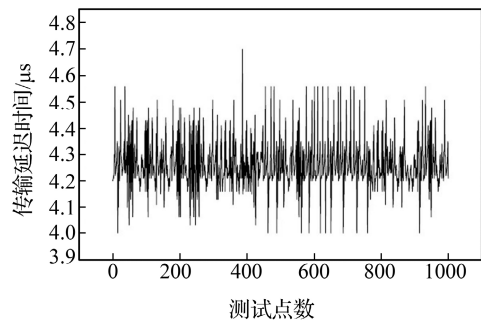


图 5 反射内存网络数据传输延迟时间测试

主控制器和 12 套本地控制器的数据交互是建立在极向场电源控制系统的核心控制网络上实现的，核心控制网络是实时高速以太网 10G 网络，主

控制器采用用户数据报协议(UDP)组播协议向 12 套本地控制器发送极向场电源控制参数, 12 套本地控制器加入到组播群, 接收来自极向场电源的参考电压和时序逻辑控制信号, 完成对极向场电源变流器等单元的实时控制。经过测试, 主控制器和 12 套本地控制器双向发送数据, 每 ms 发送 2kB 数据, 以 1000s 为一个统计周期, 24h 后根据每个统计周期的丢包率进行统计分析无丢包, 如图所示最大延时时间为 67 μ s、平均延时时间为 51 μ s。

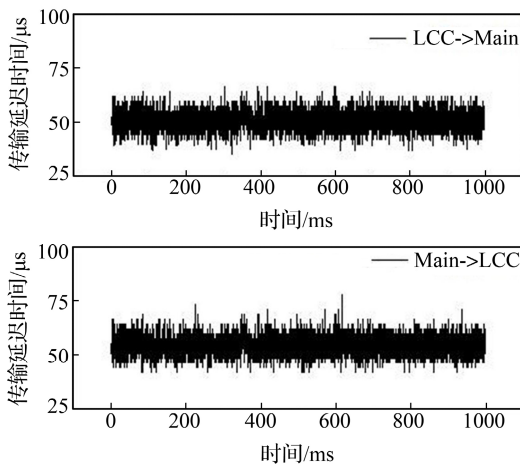


图 6 随机抽样 1000s 的双向延时时间

3.4 实时控制

由于极向场电源系统的特殊性, 主控制器必须具有 PCS 对极向场变流器的电压和电流控制功能。因此主控制器的实时控制有本地调试模式和 EAST 实验放电模式 2 种模式。图 7 给出了本地调试模式时主控制器实现的实时控制方法, 在状态请求为 EXCITATION 时主控制器将预设波形读出并储存在缓存里, 如果是电压控制模式, 则在每个控制周期内输出对应的每套极向场电源的参考电压; 如果是电流控制模式, 则在每个控制周期内将当前的预设电流值和对应的主回路电流进行 PID(比例、积分、微分)运算得出相应的电源参考电压。此时再由主控制器通过 UDP 组播方式发布至核心控制网络, 本地控制器加入组播, 并读出对应的极向场电源参考电压, 实现对变流器的实时控制。图 8 所示给出

了一套极向场电源典型的电流控制调试波形, 包括等离子体放电时的关断波形, 可以看出主控制器实现了对极向场电源的实时控制。

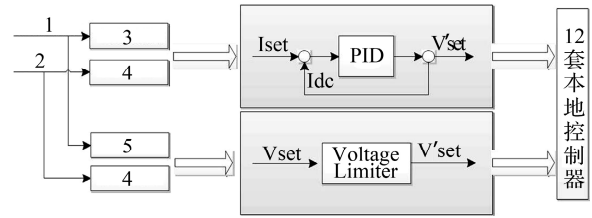


图 7 本地调试模式时实时控制示意图

1——实时控制模式; 2——状态请求; 3——电流控制模式; 4——EXCITATION; 5——电压控制模式。

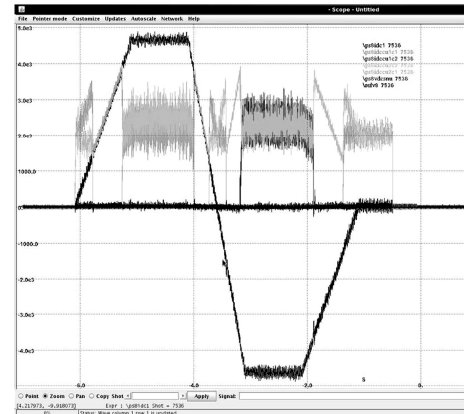


图 8 ps8 四象限运行波形

3.5 控制程序设计

极向场电源主控制器软件是一个单进程多线程的程序, 由全局变量存储所有控制参数, 采用互斥访问机制, 按照实时控制的要求控制周期是 1ms。图 9 给出了主控制器程序采用模块化设计, 包括 8 个模块。主模块为主控制器程序的核心模块, 主要工作有系统的初始化和退出, 线程的生成和退出, 1ms 定时器的启动, 全局内存的创建和初始化。现场总线通信模块是和极向场电源安全连锁现场总线控制器进行数据交互, 读取状态量, 发送开关控制等信号, 采用 UDP/Modbus 协议。以太网通信模块有 2 个线程: 一个线程是主控制器和 12 套本地控制器的数据交互, 采用 UDP 协议; 另一个是主

控制器和总体控制系统实现数据交互，采用传输控制协议(TCP 协议)。1ms 定时器任务包括实时控制模块、PCS 通讯模块、主控管理模块、数字输入输出模块和故障处理模块 5 个模块，采用顺序执行方式。

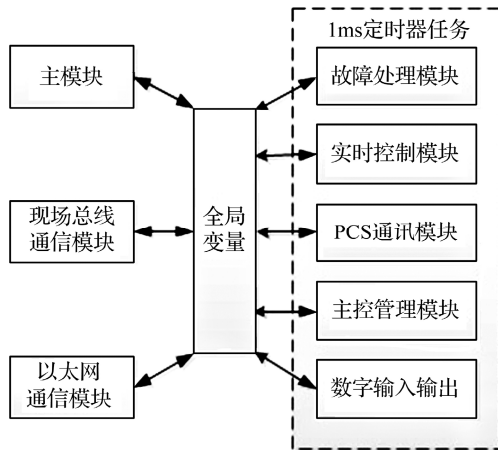


图 9 主控制器软件架构

主控制器的任务繁多，但是必须保证 1ms 控制周期内能够完成任务调度，因此必须测试其每个控制周期内的进程调度时间。在每次进入控制周期使用函数 `int clock_gettime(CLOCK_REALTIME, &tm)` 获取当前机器时间 `u64before`，一次任务调度结束后再次使用函数 `int clock_gettime(CLOCK_REALTIME, &tm)` 获取当前机器时间 `u64now`，然后得出一次进程运行时间 `diff=u64now-u64before`，单位为 ns。经过测试，每个控制周期进程调度平均时间约 86.5 μ s，最大调度时间是 150.7 μ s，如图 10 所示，可以得出主控制器的每个控制周期内实际花费的时间远小于设定的 1ms 控制周期。

4 结论

极向场电源主控制系统的核心控制计算机主控制器选用实时 Linux 作为系统集成的平台，采用

单进程多线程方式编程，模块化设计，控制周期为 1ms。通过对原型系统进行测试分析，完全能够满足极向场电源控制系统的实时性要求。本方案已经在 2015 年秋季的 EAST 试验的极向场电源控制系统平台通过验证，证实基于实时 Linux 的极向场电源主控制器是实时的，其控制程序及整个网络是稳定可靠的。

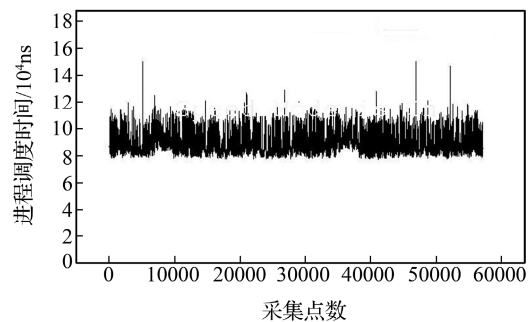


图 10 主控制器进程控制周期调度时间

参考文献：

- [1] 陈海春, 傅鹏, 吴勇. 基于 QNX 的实时电源控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(5): 431-434.
- [2] 郑锐, 傅鹏, 何诗英. 反射内存网在 EAST 极向场电源控制系统中的实现 [J]. 化工自动化及仪表, 2009, 36(3): 64-66.
- [3] 杨亚龙, 陈飞云, 傅鹏, 等. EAST 极向场电源监控系统的设计与实现 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2007, 27(3): 217-221.
- [4] 何诗英, 傅鹏, 杨亚龙. 基于 QNX 的 EAST 极向场电源现场层实时控制的设计与实现 [J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(1): 44-47.
- [5] 张俊霖, 王世好. 实时操作系统综述 [J]. 电脑知识与技术: 学术交流, 2011, 07(18): 4491-4492.

Design of master control system for poloidal field power supply based on real-time Linux

HE Shi-ying, HUANG Lian-sheng, GAO Ge, SHEN Jun, WANG Guang-hong
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: In order to meet extremely requirements of real-time responds for control system of poloidal field power supply, the real-time Linux is choosed as the system platform, an opened-source code, extensible Eclipse based on C/C++ as development tool, and a master control system for poloidal field power supply is designed. This design realized real-time communication and real-time control with 12 sets local controllers of poloidal field power supply system in a control cycle (1ms). A feasibility solution about some key problems of the main controller was presented, such as high-speed communication and real-time control, stability and reliability and so on. The design is evaluated and tested, and it completely meets the real-time requirements of control system for the poloidal field power supply.

Key words: Poloidal field power supply; Main controller; Real-time Linux; Timer; Real-time control; High-speed communication