

# HT-7U 极向场电源实时分布式控制系统设计

曹园 傅鹏 吴勇 胡利中

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥 230031)

E-mail:ycao76@yahoo.com.cn

**摘要** 论文介绍了 HT-7U 极向场电源实时分布式控制系统的设计。通过诸多方案的对比和筛选,论述了分布式实时操作系统 QNX 作为系统软件开发平台的优越性,提出了多层次网的系统结构。

**关键词** HT-7U 极向场电源控制 实时 分布式 QNX

文章编号 1002-8331-(2004)02-0211-04 文献标识码 A 中图分类号 TP273

## The Design of HT-7U PF Power Supply Distributed Real-time Control System

Cao Yuan Fu Peng Wu Yong Hu Lizhong

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

**Abstract:** This paper describes the design and realization of the distributed real-time control system of PF power supply sub-system of HT-7U superconducting TOKAMAK. By comparing many design schemes, the authors conclude that QNX, a network-distributed realtime operating system (RTOS), is an ideal soft-development platform for the project, and worked out a multi-subnets framework for the whole system.

**Keywords:** HT-7U PF power supply control system, Real-time, Distributed, QNX

### 1 引言

“HT-7U 超导托卡马克聚变实验装置”是国家九五重大科学工程。极向场电源是托卡马克主要的子系统之一,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,实时性、可靠性要求甚高。

在 HT-7U 超导托卡马克装置上均匀分布着 14 个极向场线圈,根据等离子体运行条件和极向场参数,可以将其等效为 6 对线圈,因此极向场电源系统由 6 套电源组成。每套电源主要由 10KV 交流电网、交流变压器、可控整流器、可控硅开关、失超和短路的后备保护开关,以及相应的控制、测量、保护、控制驱动等组成,这些装置具有较强的分散性。

系统有近 700 路信号,控制周期为 1.3 毫秒,系统设计放电时间为 1200 秒。在控制周期系统需要完成数据采集、处理、网络传输、备份、监控等任务。需要设计一个稳定可靠、易升级、便于扩充升级、高性价比的分布式实时极向场电源控制系统,为托卡马克的物理实验提供强有力的保证。

对于设计可靠有效的实时系统来说,基本原理和技术基本相同,都包括:周密的设计系统结构,有效的选取开发工具,完整的调试运行系统。

### 2 系统设计

#### 2.1 开发工具的选取

整个控制系统由近 20 台 ISA/PCI 总线加固型工业 PC

(IPC)组成。IPC 经过了工业化改造,虽然其本质上仍然不是工业型 PC,但由于其软硬件的兼容性、低廉的价格、性能更新迅速等优点,同时其性能基本可以满足实验条件需要。

鉴于 HT-7U 极向场电源控制系统的特点,作者选择以实时操作系统为基础,在实时操作系统平台上开发针对系统的实时应用软件。以此方式构建系统,适应性好,性能优异,扩充升级方便,且工作量适中。对操作系统平台的要求是:

- (1)成熟、可靠、稳定;
- (2)满足“强实时”百分之百支持 x86 处理器;
- (3)强大的分布式网络功能;
- (4)多任务运行,具有高效的控制调度进程的能力;
- (5)便于开发 I/O 设备驱动程序;
- (6)良好的人机界面的开发工具;
- (7)完备的软件开发环境;
- (8)良好的客户支持,丰富的文档资源,优异的性价比。

在系统设计阶段,作者主要侧重于 DOS、WinNT、Vxworks、QNX 四个操作系统的调研。最终,结合系统实际情况,综合各种指标、以及部分测试结果最终选定 QNX 作为控制系统的软件开发平台。

在通常所见的通用操作系统中,MS DOS 是一个单任务的、内核不可重入的系统,当然不是实时操作系统;通用 UNIX 系统采用分时调度策略,也不是实时操作系统;Windows NT 虽然采用抢先调度策略,但不能在内核中抢先,因此也不是实时操作系统,只能用于联机事物处理系统一类弱实时应用之中。这些强制提供实时响应的操作系统同专为实时响应设计的操

**基金项目:**“九五”重大科学工程:HT-7U 超导托卡马克的核聚变实验装置的一个子项目;国家发展计划委员会“投资(1998)1303 号项目”(子项目)

**作者简介:**曹园,硕士研究生,研究领域:计算机控制,嵌入式实时操作系统。傅鹏,研究员,研究领域:核聚变装置电源,电力电子及自动化。吴勇,学士,研究领域:现场总线技术,计算机控制。胡利中,硕士研究生,研究领域:现场总线技术,计算机控制。

作系统还是无法比拟的

VxWorks 5.31 是一个优秀的实时操作系统,在我国拥有较多用户,但有几项不符合上述要求:

(1)“一个分布式系统范围内如果没有‘让多个进程进入的共享内存’区域,VxWorks 5.3.1 由于自身结构问题,在这样的环境中提供了很弱的进程间的通信能力<sup>[2]</sup>。”VxWorks 本质是一个集中式的实时操作系统。

(2)VxWorks 是建立在 VME 总线基础上的优秀的实时操作系统(VxWorks 也支持 x86,但是其工作最好的硬件平台是 VME 总线 & 68K 系列处理器),其中 VME 模块是中高档的硬件产品,价格十分昂贵。

(3)同大多数实时操作系统一样,VxWorks 开发用户界面程序的能力很弱

采用 VxWorks 及其配套的硬件 VME 总线,同时节点间通信采用实时网络互联技术达到分布式节点间的紧耦合,这种软硬件配置方案出现在国外众多的核聚变装置的分布式控制系统中。实时互联技术是一个内存复制或转储机制及一个锁定信息流互联设备,比传统的基于网络的消息传送速度更快,支持多种计算机硬件平台的高速低延迟互连。不同公司的实时网络产品名称又不尽相同:VMIC 称之为反射内存,Stryan 公司称之为共享内存,SBS 称之为广播内存。此方案本质是用硬件手段弥补了 VxWorks 在分布式通信这方面的缺陷。这套方案的实时性、可靠性都很好,但是硬件(VME、实时网络互联设备)的价格不是系统所能接受的,势必需要寻求另外一种廉美的解决方案。此外,获得硬件产品的快捷性、产品可选择性、系统升级方便性也是考虑的主要因素之一。

QNX4.25 是一个多任务、多用户、分布式、可嵌入的符合 POSIX 标准的微内核的实时操作系统。它能够满足对实时操作系统提出的大部分要求。QNX 是 x86 平台上最优秀的实时操作系统(Neutrino 及 QNX6.x 版本能运行在很多 RISC 处理器上),在世界范围内近 100 个国家中拥有客户。

作为一个分布式实时操作系统,QNX 节点间的网络服务采用 FLEET (Fault-tolerant networking, Load-balancing on the fly, Efficient performance, Extensible architecture, Transparent distributed processing)网络技术。消息传递构成了 QNX 体系结构的基础,并改善了整个系统所有进程间交互通信的效率。专有的 FLEET 是个小巧而且高速的网络协议程序,具有高度的灵活性。通过在这个系统中最基础的层次上提供网络服务,任何在 OS 体系结构中更高层次上提供的服务都可以被在局域网任何地方的任何进程透明地访问。从用户进程的角度看来,本地的调用和网络调用没有什么区别,因此所有的网络上的节点资源可以在网络上任何地方透明地得到。可将物理上隔离的多个机器变成一个逻辑上的超级计算机。环境的透明性也使分布式应用便利起来,系统网络编程的工作量也大大减少。

同时,QNX 是具有灵活结构的网络。由于所用的设备和协议对应用程序和用户完全透明,因此 QNX 允许在不对程序做任何改变的情况下随时地引进新的网络结构。可以使用以太网,也可以使用 Arnet 或者 FDDI 等。

QNX 就是一个适合实时控制及软件/硬件定制的操作系统。一般应用 QNX 几个月后,就能写一个高度可靠且稳定的设备驱动程序了。并非编程者有天才的编程能力,而是 QNX 本来就是设计成用来让使用者开发和扩展的,且有一些现成的例子可以模仿。

212 2004.2 计算机工程与应用

同 VxWorks 不同的是 QNX4.25 提供了全部的内存和优先级保护,这使得该系统程序更加健壮。QNX 4.25 的 Photon 可以方便地编写图形界面。它占用资源少,是目前世界上占用内存最小的窗口图形界面软件。PHAB (Photon Application Builder)使得界面开发更加容易。相比其它的实时操作系统微弱的界面开发功能,更是难能可贵。QNX 遵从 POSIX 标准使得 UNIX 下的程序移植也很方便。QNX 软件包包括 Watcom 高度优化的编译器和工具。

## 2.2 系统结构设计

可以将整个极向场电源控制系统分为三层(见图 1)。

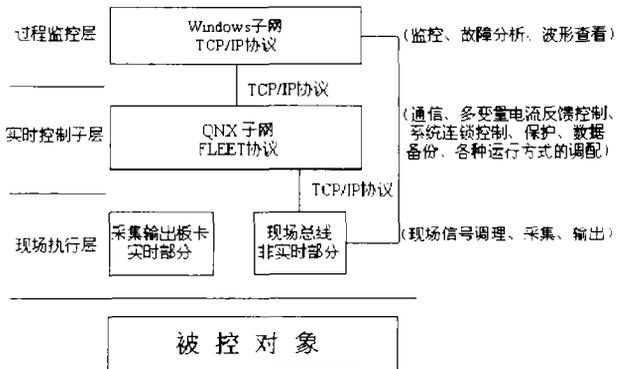


图 1 系统结构原理图

(1)Windows 子网层,该子网内的节点间通信通过 TCP/IP 协议。该层负责监控、故障诊断、波形查看等功能。此层部分数据可以直接从 QNX 子网内的数据服务器节点中抓取,部分从现场总线层获得。该层最贴近用户,有友好的用户界面。该层大大减轻了 QNX 子层的子网实时通信、节点实时性的压力。

(2)第二层是 QNX 子网层,该子网内的节点间通信通过 QNX 专用 FLEET 协议。该层担负着电源系统多变量反馈控制,系统过程控制、连锁控制、保护及各种运行方式的调配。该层需要进行大量的实时数据采集、历史数据库备份、整流器控制、节点间的通信等。该层是整个控制系统的核心,各节点间合理有序的实时通信是保证系统实时稳定运行的关键。

(3)第三层是现场(Fieldbus)总线层。由大量的现场总线控制器及现场总线模块组成。该控制器所带的现场总线模块采集现场慢模拟量信号及开关量信号。可该层直接处理一些信号,进行一些保护,无需上一层干涉。此外,该层部分信息通过网络传输到 QNX 子层或者直接送到 Windows 子层,以供处理或备份。

分布式系统实时性有两级含义。第一级是指基本控制器的实时性。每台基本控制器实时性将由该节点上的多任务实时操作系统保证。第二级是指通信子网的实时性。一个分布式控制系统的通信子网可能是由几种拓扑结构采用不同协议的子网复合而成,这些不同层次子网所提供的响应时间的快慢也不同。采用复合型结构有利于网络本身的扩展与延伸,具有良好的扩展性,同时也是出于实时性的需要。

系统各层通信的特点性质不同,因此对通信量大小需求不同,对实时性的要求也不同。Windows 子层主要汇总了来自各控制现场的信息,因此通信量大,信息报文长,传送距离可能比较远,而实时性要求比较低。针对这些特点,这一级网络应当强调信道利用率。然而 QNX 子层(设备级、装置级)过程数据很

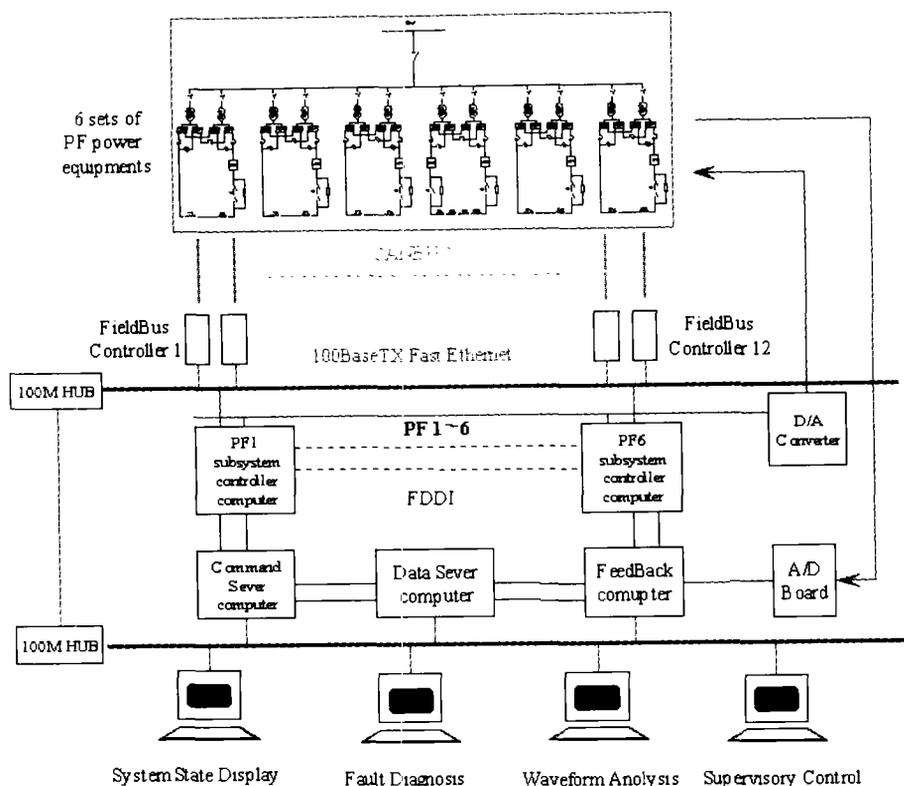


图2 控制系统简图

短,信息报文不长。每个节点相对独立,有一定自治能力,需要交换的信息相对比较少,实施对现场的快速信号的直接控制,对实时性要求高。针对这些特点,该层的通信网络应当强调响应时间,突出实时性。

采用复合型结构,对于不同层次采用不同拓扑结构,选用不同的存取控制方法及通信协议来建立通信网络,较好地解决了响应时间与信道利用率这一对矛盾(见图2)。

工业控制局网中越靠近生产对象的通信子网,其通信协议的层数也应变得越少,经常使用简化协议。作者在Windows子层采用TCP/IP协议;QNX层的FIET协议是个专用的轻协议,优点当然不言自明;在现场总线层采用CAN BUS协议。各子层之间通过标准的TCP/IP协议通信。下面说明各层的拓扑结构和介质访问方法。

Windows子层和现场总线层,采用了总线型,节点间利用一个100M的HUB互联,构成一个100BaseTX Fast Ethernet。

100BaseTX快速以太网的介质访问方法CSMA/CD法属于不可预测的,但通信负载比较小的条件下,CSMA/CD法的响应速度很快,具有非常好的实时性。把时间约束条件换成通信负载约束条件,同样可以保证实时性。FDDI的介质访问是基于令牌,具有很好的可预测性;其自恢复特性,增加了系统的可靠性。

(1)当消息较短,网络较为空闲时,以太网提供的性能要优于FDDI。

(2)当网络拥塞程度上升时,以太网性能下降,而FDDI仍然可以提供较好的服务。

QNX子层消息长度一般比较短,此时若能够严格控制QNX子网的网络拥塞程度可以利用以太网提供较好的性能。

这也是为何要分层原因之一。此外,利用Switch连接子层的节点,可以减少碰撞。

也可以利用FDDI提供较高质量的可预测性服务。仅仅需要添加适当的硬件。由于QNX所用的设备和协议对应用程序和用户完全透明,允许在不对程序做任何改变的情况下随时引进新的网络结构,这还是比较方便的。

在最底层的设备级装置级这一层,根据实时性将控制信号分成两部分分别处理。对实时性高的模拟量信号,直接利用在QNX层的某些节点上的I/O板卡直接处理;对于普通信号,例如温度、水压、一些开关量信号,由现场总线完成。这种结构比较容易满足实时性要求。

自控领域蓬勃兴起的现场总线技术减少了现场接线,有较强的抗干扰能力,节省了硬件数量与投资(考察系统从安装调试到运行维护整个生命周期内总投资)、减少占地面积、简化了接线、节省安装费用、节省维护开销、有高度的系统集成的主动权,便于扩充、安装、调试,减轻上位机的压力。提高了系统的准确性、可靠性及可扩充性。几经调研和筛选,作者选用了德国WAGO公司(该公司在天津有子公司)的现场总线产品,该产品工作稳定、使用简便。总线控制器选择了可编程的以太网类型(利用Windows下与其配套的软件Pro32开发程序,通过串口下载到控制器中),该控制器与系统上位机节点之间利用TCP/IP相连,编程接口标准规范。

监控子层同QNX子层通过标准的TCP/IP协议通信。考虑到实时性,及资源占用,主要利用UDP。监控子层的监控系统的界面,目前主要利用NI公司的Labview进行开发。为了进一步提高系统的易用性,对操作者进一步屏蔽QNX子层细节,将系统控制和设置图形化并移到监控子层。作者制定了一套完整

且规范的命令集合。在 QNX 子网内引入一个命令服务器 (command server) 专门解释监控子层下达的命令, 对其进行严格的语法检查、参数提取, 启动 QNX 子网内相关节点上与命令相对应的任务, 同时返回命令执行状态给监控节点。命令的客户机/服务器模式提供了高一层的系统控制, 通过命令解释器、语法检查器将一些高层的命令转换成低级的指令或者对应的程序。Windows 子层的命令客户机提供了键盘/显示器界面包括帮助提示、自动命令。QNX 子层的命令服务器维护所有命令的日志, 便于系统查询。这种服务器/客户机形式的命令分离机制还具有以下优点:

(1) 客户机程序无需在数据采集节点上运行, 它在显示或者监控节点上运行更加合适。这使得用户可以重新启动监视节点甚至都不会影响正在进行的数据采集。

(2) 这样多个节点可以作为客户机向命令服务器节点发送数据。而命令服务器只管执行和读命令, 无需在意来自不同的客户机。最后, 总结一下采用复合型结构带来的优点:

- ① 便于系统模块化;
- ② 提高实时性;
- ③ 提高分布式能力、可扩充能力;
- ④ 降低成本 (QNX 节点数减少、现场总线);
- ⑤ 丰富可使用的软件资源 (例如监控子层可以利用 Labview 等);

- ⑥ 提高可靠性;
- ⑦ 提高可操作性 (Window 子层, 现场总线查询);
- ⑧ 简化接线、维护 (现场总线);

### 3 系统的调试运行

在现有一套电源硬件系统的条件下, 按照以上设计方案实现了控制系统, 取得了良好的实验效果。这已经能够初步验证整个软硬件设计方案的可行性和优越性。当然控制系统还有许多工作有待进一步展开和完善。主要包括: 使用 Empress 于 QNX 子层进行分布式实时数据库开发, 网络性能的优化, 分布式系统可靠性、容错性改善等。(收稿日期: 2003 年 2 月)

### 参考文献

1. 曹园. HIT-7U 极向场电源分布式实时控制系统[D]. 硕士学位论文. 中科院等离子体物理研究所, 2002
2. <http://www.dedicated-system.com> Comparison Between VxWorks/x86 5.31, QNX 4.25 And PSOS SYSTEM/x86 2026
3. V Aleinikov, S Paschenko, JINR, Dubna. USING COMMERCIAL SCADA IN CONTROL SYSTEM FOR ECR CYLAB Russian Federation
4. 张云生编著. 实时控制系统软件设计原理及应用[M]. 国防工业出版社
5. 邱公伟等编著. 实时控制与智能仪表多微机系统的通信技术[M]. 清华大学出版社

(上接 92 页)

明该神经网络能够正确区分不同的纹理类别, 同时验证了纹理所提特征的有效性。

(3) 图 6 所示为纹理的谱直方图训练样本图 (已作归一化):

表 1 网络训练后纹理类别到竞争层的映射

(用箭头→表示映射关系)

输入模式	竞争层神经元的二维映射
纹理 1	4 个模式→(5,5)神经元
纹理 2	1 个模式→(4,2)神经元, 3 个模式→(4,3)神经元
纹理 3	4 个模式→(1,1)神经元
纹理 4	4 个模式→(1,5)神经元
纹理 5	4 个模式→(3,5)神经元
纹理 6	4 个模式→(5,1)神经元

表 2 网络训练后纹理类别到竞争层的映射

输入模式	竞争层神经元的二维映射
纹理 1	9 个模式→(5,5)神经元
纹理 2	5 个模式→(4,3), 1 个模式→(4,3), 3 个模式→(5,3)神经元
纹理 3	9 个模式→(1,1)神经元
纹理 4	9 个模式→(1,5)神经元
纹理 5	9 个模式→(3,5)神经元
纹理 6	9 个模式→(5,1)神经元

虽然缩小图形隐藏了很多细节, 但相同纹理的共性以及不同纹理之间的异性从大致轮廓上仍然可以比较明显地体现出来。略去其它点值, 这里只标出归一化的谱直方图在 0 点的取值。

网络训练结束后, 联接权矢量记忆了不同的输入模式。以 (5,5) 和 (1,1) 神经元为例, 图 7 所示为它们的权矢量图, 表明这两个神经元很好地记忆了纹理 1 和纹理 3 的归一化谱直方图特征。

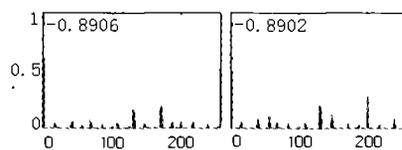


图 7 神经元的权矢量图

(左为 (5,5), 右为 (1,1) 神经元的权矢量)

### 5 结论

该文将局部谱直方图作为纹理提取特征, 利用 SOFM 网络的自组织特性区分不同类别的均匀纹理, 实验证明算法简单有效。算法适用于均匀纹理分类, 下一步可改进纹理特征的提取方法, 以适用于更为复杂的纹理。(收稿日期: 2003 年 2 月)

### 参考文献

1. Lohmann G. Co-occurrence-based analysis and synthesis of textures [C]. In: Computer Vision & Image Processing Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition, 1994; 1:449-453
2. Porter R, Canagarajah N. Robust rotation-invariant texture classification; wavelet, Gabor filter and GMRF based schemes[J]. IEEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, 1997; 144(3): 180-188
3. G Van de Wouwer, P Scheunders, D Van Dyck. Statistical texture characterization from discrete wavelet representations[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999; (8)4: 592-598
4. 闻新, 周露等. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 科学出版社, 2000: 274-278
5. 周烽, 封举富, 石青云. 一种新的基于局部傅立叶级数的纹理描述子[J]. 中国图象图形学报, 2000; 6(10): 993-997