

文章编号:1001-9081(2005)02-0434-03

## 基于 VxWorks 网络通信代理实现的分布式变电站自动化监控系统

刘青山, 姜孝华

(中山大学 信息科学与技术学院, 广东 广州 510275)

(issjxh@zsu.edu.cn)

**摘要:**研究了分层、分布式变电站自动化系统中有关网络通信功能在嵌入式操作系统 VxWorks 下的实现。综合变电系统中多方面的需求,采用当前最先进的软、硬件技术及体系构架,在 Vxworks 嵌入式实时操作系统及 PowerPC860 处理器的硬件平台上实现变电站内部网的实时数据及控制信息的传输。该系统已成功地实现了工业运行实验。

**关键词:**电力系统;变电自动化;嵌入式系统;VxWorks;PowerPC860;网络代理

**中图分类号:** TP311.52 **文献标识码:** A

### Distributed control scheme for power transformation system based on network agent of VxWorks

LIU Qing-shan, JIANG Xiao-hua

(School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou Guangdong 510275, China)

**Abstract:** An automatically-controlled power transformation system was studied and a distributed control scheme for the system was proposed and implemented in order to improve the safety and efficiency of power systems. Advanced software and hardware techniques, system architectures and safety requirements of power transformation systems were all taken into account. Real-time event and disturbance logs and control commands were communicated over a local power transformation system based on the embedded operating system of VxWorks and the hardware platform of PowerPC860 CPU. The distributed control scheme for power transformation systems realized supervisory control, data acquisition and logic functions, and has been validated by industrial experiments.

**Key words:** electric power system; power transformation automation; embedded system; Vxworks; PowerPC860; Network Agent

## 0 引言

电力系统是由发电、变电、输电、配电、用电等设备和相应的辅助系统按规定的技术和经济要求组成的将一次能源转换为电能并输送和分配到用户的统一系统。变电系统与电力系统中的发电、输电、配电、用电等环节有着紧密的联系,是保证整个电力系统安全高效运行的关键之一,是电力系统一个重要子系统。它以 RTU、微机保护装置为核心,将变电所的控制、信号、测量、计费等回路纳入计算机控制系统。保证高度可靠性、提高运行性能、便于扩展是变电站自动化系统设计的关键<sup>[1]</sup>。在传统的设计中,主要采用两种平台,即专用结构平台和通用工控平台。前者主要采用 8051、80C196 等单片机作为主 CPU,以 RS-485、CAN 和 LonWorks 作为数据通信网络,大多采用单板或自定义的小总线,有较强的针对性,系统结构紧凑,整体性能和可靠性较高,但存在着通用性、可扩充性以及系统升级等方面的不足,特别是不便扩充网络功能。后者通常采用目前广泛使用的工控机、工业 PC 和 PC104 等总线,结构通用性、可扩充性较好,易于系统升级,但由于采用通用结构,使系统有较多的冗余。随着计算机软硬件技术的快速发展,网络通信技术的广泛应用,传统构架的变电站自动

化系统无论是在性能上还是在扩展性上都不能满足变电站系统的发展需要<sup>[2]</sup>。本文介绍的变电站自动化系统采用了先进的 32 位高速嵌入式芯片,大容量 RAM 和 Flash,并配以全球最先进、最可靠的 WindRiver 公司的 VxWorks 嵌入式操作系统,用高速以太网进行通信互联。整个系统利用了当前最先进的软、硬件技术来实现变电站自动化系统的监控,大大提高了系统的可靠性、稳定性和实时性。采用的分层、分布式的嵌入式的体系构架保证了系统具有很强的可扩展性,体现了当前变电站自动化系统发展的主要方向<sup>[3,4]</sup>。

## 1 自动化监控系统中 VxWorks 网络通信代理功能

分层分布式变电站自动化监控系统中 VxWorks 下网络通信代理的功能包括:1)接收网络实时数据,发送网络实时数据;2)监视网络中节点间的通信状态,为应用模块提供网络通信接口;3)实现两级网络消息格式,实现系统对时功能、控制功能、网络路由功能、双机热备用功能。

对变电站自动化系统来说,主要的性能需求也就是其网络通信代理 Agent 的性能需求,具体包括:1)开关量变位响应时间 < 0.5s; 2)模拟量越限、复限响应时间 < 1s; 3)全实时数据传送时间 < 2s; 4)网络传输率 10 Mbps/100Mbps; 5)实时

收稿日期:2004-07-08;修订日期:2004-11-08

作者简介:刘青山,男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统自动化;姜孝华,副教授,博士,主要研究方向:电力电子技术应用、计算机通信与控制。

数据网络出错率 < 1/10 000; 6) 控制信息传输出错率 < 1/1000 000; 7) 系统可用率 99.9%, CPU 负荷 < 35%, 系统无故障间隔时间 MTBF > 27 000 小时。

系统可靠性指标包括: 1) 实时数据传输误差不得大于 1/10000; 2) 控制信息传输误差不得大于 1/1000000; 3) 系统对时误差不得大于 10ms; 4) 网络故障诊断正确率大于 99.9999%。

系统安全性指标包括: 网络通信代理的系统配置功能需

要超级用户权限, 能够对系统外的网络数据包进行识别, 控制信息传输要加带用户权限。

## 2 自动化变电系统网络通信代理子系统设计

### 2.1 网络通信代理与自动化变电系统之间的关系

变电站自动化系统中的网络通信代理 Agent 子系统是其他子系统的基础, 也是一个在功能与结构上相对独立的部分。其在整个系统中的分布如图 1 所示。

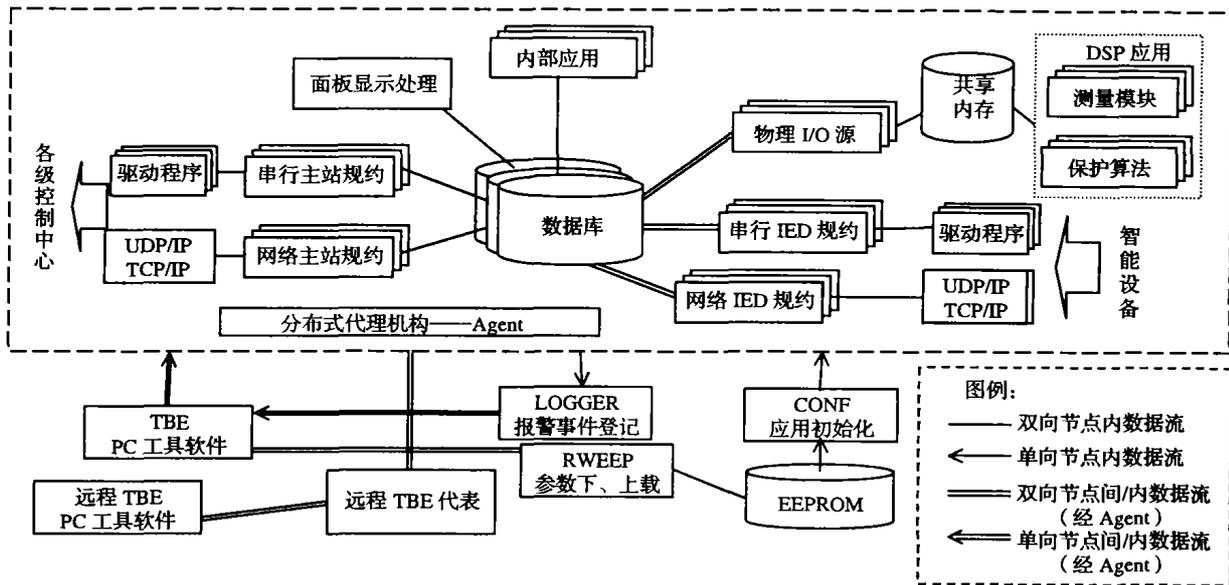


图 1 软件体系结构/数据流程图

从图 1 可知, 在系统中, 只要涉及到网络通信, 就必须与网络通信代理 Agent 关联, 即通过网络通信代理提供的接口来完成不同模块之间关于网络通信的功能。这里的网络通信包括不同节点之间的通信也包括同一点不同模块之间的通信, 至于是一节点还是不同节点则应该由网络通信代理来进行路由。

### 2.2 网络通信代理 Agent 网络协议的选择

网络是 VxWorks 系统之间以及与其他系统联系的主要途径。VxWorks 实现了与 BSD4.4 TCP/IP 兼容的网络协议栈。TCP 是面向连接的可靠传输方式, 主要适合远程网络通信。而 UDP 方式是无连接的、不可靠的传输, 但传输的效率更高, 很适合局域网络内的网络数据传输。因为变电站自动化系统的网络功能主要是处理实时采集的各种数据, 实时性要求很高, 所以系统网络通信代理利用 UDP 作为通信的传输方式。但在进行可靠性要求很高的控制命令信息传送时, 需要进行返校处理以保证可靠性。

### 2.3 网络通信代理 Agent 总体结构框图

如图 2 所示, 网络通信代理的主要功能是进行数据的接收与发送。接收与发送的数据报文是按自定义好的格式进行组织的。其中对外的数据收发是通过网络传输来实现的, 而内部数据报文的传递是通过消息方式进行传递的。

### 2.4 网络通信代理引入的消息机制

现代实时应用通常构造由一些独立的相互合作的任务的集合。虽然, 信号量提供高速的任务间同步与互斥机制, 但常常还需要一种较高级的允许合作任务之间相互通信的机制。VxWorks 中, 单 CPU 任务间主要的通信机制是消息队列。

在 VxWorks 中, 消息队列长度是可变的, 数目也是可变的。任何任务或 ISR 可以发送消息到消息队列。任何任务可以从消息队列中接收消息。多个任务可以向同一消息队列发送消息或接收消息。两个任务间全双工地通信需要两个消息队列, 每个提供一个流通方向, 如图 3 所示。

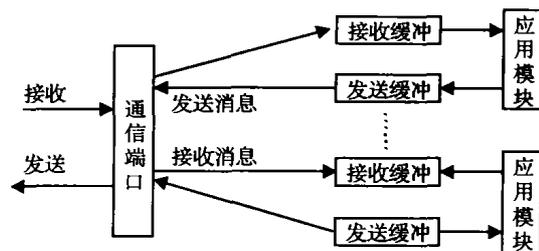


图 2 网络通信代理的结构

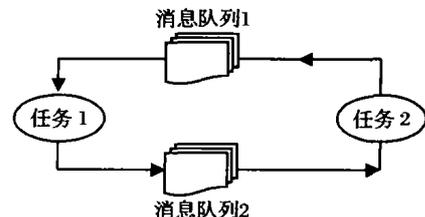


图 3 使用消息队列实现全双工通信

### 2.5 网络故障自我诊断功能设计

网络故障自我诊断能力是指网络通信代理能够自我识别各个网络之间的通信状况。在现代的操作系统中都有相应的软件能够自我检测本机与网络连接的状况。变电站自动化系统参考了常见的操作系统在处理检测网络连接状况的功能, 在网络通信代理 Agent 中也引入了对网络通信状况检查的功能。对网络通信状态的检测, 可以采用硬件与软件两种方式

来实现。如果用硬件方式检测,必须在系统所在的各个节点增加相应的硬件装置来识别网络通信状态,这样不仅加大了系统的成本,也使系统不便于灵活扩展,系统的通用性大大降低。另外考虑到现在 CPU 的处理速度的提高,用软件的方法来实现网络通信状态的自我检测成为最好的解决方案,这也是最常见的解决方案。

在网络通信代理 Agent 中,首先定义好一个用于专门检测网络连通状态的数据结构。通过在网络上发送这种结构的数据报文来在不同的节点之间建立一条虚拟的网络连接。为了方便表达,在这不妨称这种报文为心跳报文。为了不明显增加不同节点之间的网络流量,心跳报文最好尽可能的短。经过分析,可以包括五个量:目的节点号、目的节点 IP、源节点号、源节点 IP、源节点的时标。然后再利用一个定时器,由每个节点定时向各自的所有目标节点发送心跳报文。接收方接收到心跳报文后,通过时标来判断该心跳报文是不是最新的,如果是,则表明该网络的连接状况是良好的。对定时器的定时时间间隔的选择需要认真考虑,如果定时间隔短,则将增大网络流量。时间太长,网络通信状况的诊断反应灵敏度将下降,该功能将变得没有实际意义。通过实验,本系统中选择时间间隔为 5 秒。

### 2.6 对时功能

时标对于变电站系统来说至关重要,系统中的不同节点和同一节点上的不同模块必须保持时间统一,所以对时功能是变电站自动化系统必不可少的部分。考虑到系统分布式的特点,对时功能在网络通信代理中实现是最有效的也是最合理的。

与发送心跳报文相比,对时报文发送不需要那么频繁。可以选择 5 分钟发一次对时报文。对时报文由服务器发出,采用广播方式一次送给系统内的所有客户端。服务器上的标准时间可以从 GPS 中得到。时间的误差为毫秒级。

### 2.7 网络控制功能

电力系统中的控制分为远程控制与就地控制。就控制的种类来看,主要包括开关量控制及对变压器等设备的调节。开关量的控制只有两种状态的转换,而对变压器等设备的调节则涉及到多种状态之间的转换。控制功能是对一些装置或设备发送命令报文来实现的。考虑到控制功能在电力系统中的重要性(不正确的控制可能造成灾难性的后果),对控制功能特别是远程控制功能的设计必须要充分考虑其安全性、可靠性。基于这种情况,本项目变电站自动化系统选择在网络通信代理 Agent 中来实现这部分功能,也就是从通信的核心模块上来实现,这可保证通信的正确性与可靠性。

网络通信代理 Agent 采用的是无连接的、不可靠的 UDP 方式进行通信,所以为了防止数据丢失,必须由程序设计者自己进行控制。可以参考 TCP 网络传输方式来对 UDP 方式通信进行增强可靠性处理。本系统中利用报文返校来建立网络连接,但只对一些重要的控制命令采用这种方式,而对实时数据例外,以提高传送效率。

### 2.8 双机热备用功能

在变电站自动化系统中,为了提高系统的可靠性,我们采用双系统结构,特别是采用双服务器。系统运行时两台服务器(主、备服务器)都处于运行状态,正常情况下以主服务器作为系统的工作服务器,当系统主服务器出现问题时,备服务器

接管主服务器的工作并立即投入运行,当主服务器恢复正常工作后,备服务器主动退出到备用状态。这种主、备服务的起停必须要从全局的角度来考虑。通过对系统的总体功能分析,在网络通信代理中实现这个功能是最理想的。

为了在网络通信代理中实现双机热备用的功能,首先建立一个相应的数据结构。在数据结构中包含了所有的用于双机热备用的信息。双机热备用的信息主要是在主、备两台服务器及客户机之间传送。具体的做法是:在正常运行的情况下,主、备服务器进行心跳,当备机检测到主机故障(客户机如果与主服务器连接不上,则会向备服务发送信息,此时备用服务器认为主服务器出了故障),备用服务主动切换为主服务器。转换后向网络广播切换的结果。当出现故障的主服务器恢复正常时,如果发现网络中另有一台机充当主服务器的角色,则主动进行切换,将自身变成主服务器,并发送切换报文去停止另一台主服务,使其变成备服务器。这些过程都在网络通信代理 Agent 中完成。完成的结果通过提供函数接口让其他的应用模块获得。

### 2.9 程序流程图

根据需求分析及总体设计要求,可以得出网络通信代理 Agent 的程序流程图如图 4 所示。流程主要是以数据流为依据的。

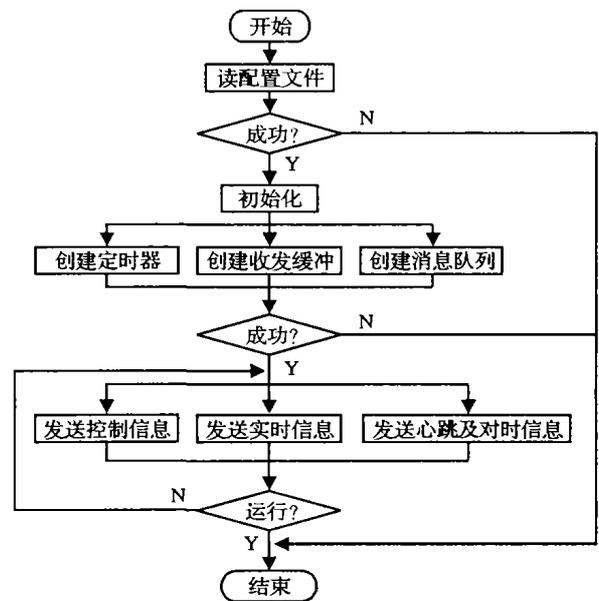


图 4 网络通信代理 Agent 程序流程图

## 3 测试过程描述及结果分析

建立一个测试环境测试系统的实时数据传输功能,将网络通信代理及 VxWorks 其他相关应用程序在目标机上运行,目标机上运行的操作系统是 VxWorks。首先运行嵌入式的实时数据采集程序,再通过 VxWorks 下的网络通信代理将采集来的实时数据进行发送,具体发送的目标地主要是看网络通信代理运行前的配置,再配置一台宿主机作为嵌入式网络通信代理的一个唯一目标地。也就是嵌入式目标机上采集来的实时数据通过网络代理发向宿主机,既开发机。为了便于观察嵌入式环境下程序的运行结果,我们在宿主机上同样也运行一个运行于 Windows 下的网络通信代理,以接收数

(下转第 439 页)

完成一连串的调用后返回,这样会使得几个输出引脚的数据传递不同步,造成系统时序混乱和运行结果不正确。为了信号传递尽可能同步,可以使用一个队列,采用间接调用的机制,如图 5 所示。

输入引脚在使用 putData()接收数据后,不采用直接调用其所在软芯片对象的 OnData()来驱动软芯片处理数据,而是将软芯片对象指针加入队列排队然后立即返回。工作线程从队列头部获取软芯片对象,调用其方法 OnData()执行软芯片的功能,然后发送数据,如果输出引脚有连接,则使用输入引脚方法 putData()接收数据,然后又将新的软芯片对象指针加入队列。这样重复,直到队列为空或运行被中止。在工作线程启动之前,应该先激活信号源软芯片(比如时钟、电源等)并加入队列中,用于驱动整个系统运行。按照加入队列的先后次序执行软芯片,可以模拟出正确的信号传递时序。

## 2 软芯片实例设计

下面以一个 1 位半加器软芯片为例来说明如何编程模拟芯片的功能。图 6 是半加器软芯片的模型, A 和 B 是两个数据输入引脚, C 是进位输出引脚, S 是和输出引脚,这四个引脚的 ID 分别设置为 0,1,2,3。

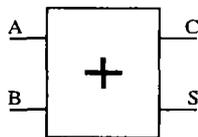


图 6 1 位半加器软芯片模型

要模拟半加器的功能,主要是对 ILDataObject::OnData() 进行实现,下面是在 VC++ 中编写的程序。

```
STDMETHODIMP CChipAdd::OnData()
```

(上接第 436 页)

据,再发送给运行于微机上的实时数据广播程序,以便向整个网络内进行实时数据广播。这样就保证了所有客户机上都能同时刷新实时数据。其中广播程序接收到的数据情况如图 5 所示。从图中可以看出接收到了很多数据,再分析接收来的数据,可以发现接收到的数据与从嵌入式目标机上发送来的数据一致,主要包括了模拟量与开关量的值。结果表明广播程序接收的数据量与嵌入式目标系统上发送的数据量一致。图中显示采集来的数据为十六进制格式。每一个数据包包括一个信息头,具体信息头是按模拟量与开关量进行分类,其中还包含一次采集来数据点个等信息。

通过运行变电站自动化系统中的 SCADA 子系统(数据采集与监控系统)测试了控制命令信息传输与双机热备用的功能。通过模拟量数值大小的变化测试调节命令的执行情况。模块量的调节主要是对一些变压器档位的调节。测试结果表明,改变变压器的档位时,其对应的数值也发生改变,并且数值改变的方向与调节的方向一致,这就证明调节操作是正确的,也就证明了网络通信代理运行正确。

## 4 结语

本文介绍的变电站自动化系统已经开发成功并投入运行。投入运行以来,运行状况良好,达到了预期的效果,但是仍然有以下几方面需要待进一步研究:1)完善网络通信代理,提高易用性;2)增加嵌入式系统的 GUI 功能;3)完善通

```
{
short dataA, dataB;
m_pchip->getData(0, &dataA); //读引脚 A 数据
m_pchip->getData(1, &dataB); //读引脚 B 数据
short s = (dataA + dataB) % 2; //求和
short c = (dataA + dataB) / 2; //求进位
m_pchip->sendData(2, c); //进位输出
m_pchip->sendData(3, s); //和输出
return S_OK;
}
```

## 3 结语

本文阐述了使用 COM 技术来仿真硬件芯片,从新的视角提出了一种系统仿真的新方案。利用它设计的仿真模型具有构件化,易重用,便于集成的特点。本文提出的软芯片模型,不仅适用于电子系统的仿真,对于控制系统仿真,组态软件设计同样适用,我们在此基础上建立了可视化的软集成电路设计模型,即开发一种可视化的设计平台,像画硬件电路图那样对软芯片进行连接、配置,可以采用 XML(可扩展标记语言)来作为软芯片构件的粘合剂,配置好的模块可以重用、发布和运行。目前我们已经开发出这样的系统,还需要在以后的阶段中进行完善。

### 参考文献:

- [1] 潘爱民. COM 原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [2] 白中英. 计算机组成原理[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [3] 李明君,张颖明. 基于面向对象语言的芯片仿真技术[J]. 计算机工程,2003,19(11):162-164.
- [4] 王建新,陆炜妮,王伟平. 基于组件的数字图形处理仿真系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报,2004,16(6):1213-1216.

信规约,使自动化系统与远程调度系统通过标准协议进行通信,也就是通过国家定义好的规约进行。

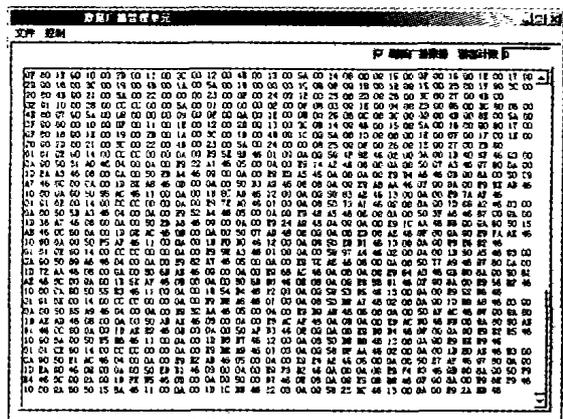


图 5 实验数据

### 参考文献:

- [1] 朱大新. 变电站综合自动化与无人值班[J]. 电力系统自动化,1994,18(11).
- [2] 陈玉兰. 面向对象的变电站综合自动化系统[J]. 电力自动化系统,1997,21(7).
- [3] 陈正石. 扩频技术在电力载波通讯中的应用分析[J]. 电力系统通讯,1998,(1).
- [4] 陈竟成. 配电管理系统(DMS)及其应用功能[J]. 电力系统自动化,1999,123(18).