

基于嵌入式 Linux 的电能质量在线监测系统的研究

张言权¹, 张胜宝²

(1. 广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 523120; 2. 广东电网公司深圳供电局, 广东 深圳 518001)

摘要: 嵌入式系统是面向应用的专用系统, 与桌面计算机系统相比, 在性能要求、系统构成、应用领域等方面都有显著差异。介绍了嵌入式 Linux 的基本知识和针对嵌入式设备的应用特点, 阐述了嵌入式 Linux 的主要技术以及在电能质量监测领域的应用方法。结合具体硬件平台详细说明了嵌入式 Linux 技术在开发电能质量监测系统上的应用。

关键词: 嵌入式系统; 电能质量; ARM; Linux; DSP

Research on power quality online monitor system based on embedded Linux technology

ZHANG Yan-quan¹, ZHANG Sheng-bao²

(1. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Dongguan 523120, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Shenzhen 518020, China)

Abstract: Embedded systems are application-oriented real-time systems. They are different from desktop computer systems in performance requirements, system organizations and application areas. Aiming at the application characteristic of the embedded equipments, an embedded system based on Linux is introduced. The main technique of the embedded Linux and its application in power quality fields are described. At last, the main realization method of embedded Linux system on a special hardware system is introduced.

Key words: embedded systems; power quality; ARM; Linux; DSP

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)07-0071-05

0 引言

在当前数字信息技术和网络技术高速发展的后 PC 时代, 嵌入式系统已经广泛地渗透到科学技术研究、工程设计、军事技术、工业产品以及人们的日常生活等方面中, 随着国内外各种嵌入式产品的进一步开发和推广, 嵌入式技术应用也越来越广泛, 人们把以应用为中心, 以计算机技术为基础, 软件硬件可裁剪, 符合应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗的严格要求的专用计算机系统称为嵌入式计算机系统。

上世纪 70 年代的嵌入式系统往往都不采用操作系统, 使用简单的循环控制对外界的控制请求进行处理, 随着应用系统越来越复杂、利用范围越来越广泛, 到 20 世纪 80 年代末嵌入式系统出现了各种各样的商业嵌入式操作系统百家争鸣的局面, 比如 Vxwork、pSOS、Nucleus、Windows CE 等, 这些操作系统大部分是为专有系统而开发的。另外, 源代码开放的嵌入式 Linux, 由于其强大的网络功能和成本低廉, 近年来得到了飞速的发展和应

用, 前正在开发的嵌入式系统中, 49% 的项目选择 Linux 作为嵌入式操作系统。

电能质量的恶化直接威胁着国民经济的安全、正常运行。如何提高和保证电能质量已经成为我国电力系统面临的重要问题, 这样为改善电能质量和制定有关电能质量的治理措施和政策提供必要的现实依据, 并且电力部门需对电能质量进行连续的监测。

开发和使用新型的高性能、适用性强的电能质量监测系统将成为一种必然, 其中一种新型的采用嵌入式 Linux 技术的电能质量监测系统将能很好地满足其不断发展的需要。

1 嵌入式 Linux 构成与特点

1.1 嵌入式 Linux 的构成

由 Garlan 和 Shaw 提出把嵌入式 Linux 系统划分四层次:

(1) 硬件部分

主要包括 Linux 安装时需要的所有可能的物理设备。例如 CPU、内存、硬盘、网络接口等等。

(2) Linux 内核

内核是操作系统的灵魂，Linux 内核主要包括内核抽象和对硬件资源的间接访问，主要负责管理文件、内存，启动系统并运行程序，负责从网络上接收和发送数据包等，简而言之，内核实际上是抽象的资源操作到具体硬件操作细节之间的接口。Linux 内核主要由五个子系统组成，如图 1 所示。

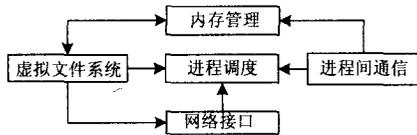


图 1 Linux 内核的抽象结构 (箭头表示依赖关系)

Fig.1 Linux cores abstract structure (The arrow means dependence)

进程调度(SCHED)：它控制着进程对 CPU 的访问。当需要选择下一个进程运行时，由调度程序选择最值得运行的进程，可运行进程实际上是仅等待 CPU 资源的进程。利用进程调度来实现进程间并行化、简单有序、互不干扰、事务化的特点。

内存管理(MM)：它允许多个进程安全地共享主内存区域，Linux 的内存管理支持虚拟内存，必要时，由操作系统负责在磁盘和内存之间交换程序块。内存管理从逻辑上可以分为硬件无关部分和硬件相关部分，硬件无关部分提供了进程的映射和虚拟内存的对换；硬件相关部分为内存管理硬件提供了虚拟接口。

虚拟文件系统(VFS)：它隐藏了各种不同硬件的具体细节，为所有设备提供统一的接口，VFS 还支持多种不同的文件系统，VFS 可以分为逻辑文件系统和设备驱动程序，逻辑文件系统是 Linux 所支持的文件系统，如 ext2、ext3、fat、jffs2 等，设备驱动程序是为每一种硬件控制器所编写的设备驱动程序模块，如串口、并口、SPI 口等。

网络接口(NET)：主要提供对各种网络标准的存取和各种网络硬件的支持，网络接口可以分为网络协议和网络驱动程序两部分。网络协议部分负责实现每一种可能的网络传输协议，网络设备驱动程序负责与硬件设备进行通信。

进程间通信(IPC)：它主要是支持进程间的各种通信机制，如管道、SYS V 机制、网络 Socket 方式和全双工管道，其中 SYS V 机制还包括消息队列、信号量、共享内存。

(3) 系统调用接口

为了在应用程序中实现特定的任务，可以通过系统调用来调用系统内核中特定的过程，以实现特

定的服务，一般认为这些调用和服务也是操作系统内核的一部分，内核的编程接口也属于这一部分。系统调用本身也是有若干条指令组成的过程，但与一般的过程不同，系统调用运行在内核模式，而一般的进程运行在用户模式。

(4) 用户进程

用户应用程序是运行在 Linux 操作系统最高的一个软件集合，当一个用户程序在操作系统之上时，它就是操作系统的用户进程，如电能质量监测系统的业务应用就属于用户进程。

1.2 嵌入式 Linux 的特点

Linux 之所以能在嵌入式系统市场上取得如此快的发展，是与它自身的优良特性密不可分的，主要表现在：

(1) 开放源码，丰富的软件资源

linux 是自由软件，用户可以自行编译内核，修改和扩充操作系统，进行第二次开发，Linux 上的软件资源十分的丰富，Linux 开发程序往往不需要从头做起。这样就大大地节省了开发工作量，缩短了开发周期。

(2) 内核功能强大，性能高效、稳定、多任务 Linux 是全面的多任务和真正的 32 位操作系统，它的高效和稳定性已经在各个领域，尤其在网络服务器领域得到了事实的验证，Linux 的内核十分稳定，而且 Linux 内核小巧灵活，易于裁剪。

(3) 支持多种硬件平台

Linux 能支持 X86、ARM、MIPS、ALPHA、SPARC 等多种体系结构。目前，Linux 已经被成功移植到数十种硬件平台，而且还出现了 ucLinux，它可以在没有 MMU 的处理器上运行。

(4) 完善的网络通信功能

Linux 的网络功能是它的强项，Linux 支持 TCP/IP 等多种协议，而且 Linux 系统内核中已经紧密地集成了网络功能并有大量地网络应用程序，为实现网络通信提供了保障。

(5) 友好的 GUI 界面

在图形系统方面，嵌入式 Linux 上既有成熟的 Embedded QT、MiniGUI、Microwin 等 GUI 系统，还有 svgalib、framebuffer 等优秀工具，可以适合不同的用途。

(6) 支持多种文件系统

Linux 几乎支持所有流行的文件系统，其中包括 ext2、ext3、fat、fat16、fat32、jffs2、ntfs、romfs 等。

(7) 支持大量的周边设备，驱动丰富

Linux 上的驱动十分丰富，它支持各种主流的

硬件设备和最新硬件技术,而且随着 Linux 的广泛应用,许多芯片厂家已经开始提供 Linux 上的驱动,这样就进一步促进 Linux 在各种硬件平台上的应用。

2 基于嵌入式 Linux 的电能质量在线监测系统的设计

现在随着大量 32 位嵌入式 CPU 价格的下降和性能指标的不断提高,这就为嵌入式系统的广泛应用提供了坚实的基础,而免费的 Linux 操作系统以其低廉的价格、源代码的开放性以及功能的完善与强大、易于移植等特点而得到了广泛的应用,下面就基于嵌入式 Linux 在 ARM 上开发电能质量监测系统详细的阐述。

2.1 硬件结构

目前大多电能质量监测系统主要采用 DSP+MCU 结构,其中 DSP 芯片主要完成信号采样以及对信号结果进行实时的变换处理;MCU 主要用来完成对 DSP 的数据的累加、统计、分析、存储处理和显示部分的人机交互以及完成与主台 PC 软件的通信。为了更好地满足电能质量监测仪的高速、高性能、多种通信方式的需要,采用 32 位的 ARM 芯片和嵌入式 Linux 来实现 MCU 部分的功能。

电能质量监测系统的硬件结构如图 2 所示。

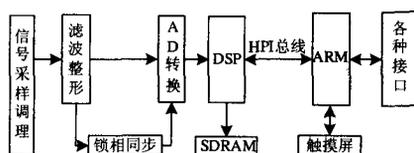


图 2 硬件结构图

Fig.2 Hardware structure

2.2 嵌入式 Linux 平台的建立

要想建立一个完整的硬件平台主要完成以下工作:

(1) 硬件的设计

MCU 部分采用 32 位的 ARM 芯片,硬件设计包括核心板、母板、电源板和接口板的设计,并且硬件设计的成功与否直接影响到整个平台建立的可行性。

(2) BOOTLOADER 的移植

在大多数 ARM 中使用的 BOOTLOADER,主要包含 U-BOOT、BOOT 和 LOADER 三部分程序组成,主要是为 Linux 的引导作准备。

(3) 配置、裁剪和移植 Linux 内核

根据不同嵌入式应用系统的要求,针对专用的

硬件进行相关 Linux 内核的功能配置、裁剪和移植 Linux 内核。

(4) 相关驱动程序开发

在电能质量监测仪中主要的驱动开发有:网络驱动、串口驱动、USB 驱动、键盘驱动、触摸屏驱动和 HPI 驱动等。

(5) 文件系统的建立

在嵌入式系统中通常要使用 Flash 存储器来保存程序代码和数据,如果直接对 Flash 和 SDRAM 进行操作的话比较困难,所以最好的解决方法是构造文件系统,使其提供方便、可靠的系统应用。

2.3 软件架构设计

由于对于嵌入式开发没有固定的开发和架构模式,我们通过综合考虑 .NET 和 J2EE 架构的各种模式,结合嵌入式系统自身的特点,提出采用三层构架模式,用户层、应用服务层、数据层。但却不同于传统的架构模式,系统软件架构图如图 3 所示。

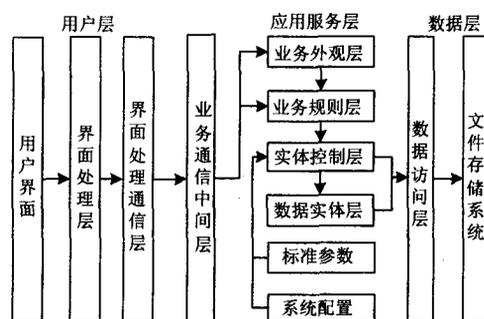


图 3 软件架构图

Fig.3 Software structure

由于用户层采用了分离和分层设计,所以用户层大不同于传统意义上的用户层,在此用户层包括用户界面、界面处理层、界面处理通信层,共同来完成触摸屏的人机交互操作、界面提交数据处理、数据通信等工作。

系统的主要功能和业务逻辑在应用服务层进行处理,对于系统框架来说,主要处理的也是这个层次的架构。并且我们将应用服务层又划分成六个层次:通信中间层、数据实体层、实体控制层、数据访问层、业务规则层和业务外观层。各个层次可以表示如下:

通信中间层: 处理所有相关通信包括网络、RS485、串口、Modem 通信,为电能质量监测系统提供通信支持,系统根据通信指令信息产生相应通信指令表,其中可以根据具体通信实际情况来对指令进行排队处理,也可以人为的设定指令执行优先级。

数据实体层: 数据的表示方式,也就是实体类

的表示方式，以及同数据文件的对应关系。

实体控制层：数据的存取方式，需要考虑的就是实体类的持久性问题，也就是同数据文件的交互问题。实体控制层用于控制数据的基本操作，如增加、修改、删除、查询等，同时为业务规则层提供数据服务。

数据访问层：提供对数据文件的访问，为了为实体控制层提供对数据文件操作的服务。这个层次通常执行以下一些操作：打开数据文件、执行数据文件操作、返回数据结果和维护数据文件。

为了统一对数据的访问方式，在设计的时候要封装常用的对各种数据文件的操作，可以访问不同类型的数据文件。

业务规则层：规则层需要完成的功能是各种业务规则和逻辑的实现。这是整个应用系统中最为复杂的部分，没有太多的规律可循。业务规则层的设计通常需要进行很好的建模工作。

业务外观层：业务服务的提供方式，它将用户界面与各种业务功能的实现隔离开来。业务外观层只是将已经完成的系统功能，根据各个模块的需要，对业务规则进行高层次的封装。

将系统架构进行分层设计，其好处是能够使得系统的架构更加清晰，并且让每个层次完成特定的功能，通过统一接口方便对系统功能进行扩充，极大地提高了系统的合适性、可扩展性、结构稳定性、可复用性，同时有利于提高产品的质量、提高软件生产率和降低开发成本。

2.4 软件实现设计

通过确定系统的整体体系构架后，在具体实施架构的过程中，我们采用了分子系统、分模块实现的思路，经过对电能质量监测仪具体的业务进行分析我们设计了四个子系统来完成系统的功能，子系统分别是：显示子系统、初始化和参数设置子系统、应用业务处理子系统、DSP 数据读写子系统。

显示子系统功能主要是完成用户和电能质量监测仪的显示交互，主要包括参数设置交互、基本电量显示、电能质量显示、电能显示、事件显示、系统自检信息显示以及相关与应用业务处理子系统的通信处理等。

初始化和参数设置子系统主要完成 MCU 和应用系统的初始化工作以及对系统进行各种参数设置工作，主要是通过共享内存和消息队列的方式向业务处理子系统提供各种标准参数和进行相关的参数设置工作。

应用业务处理子系统主要用来处理所有核心业务，其中主要包括统计分析处理、数据存储与删除、

数据查询、数据通信处理、系统管理、掉电处理等，其中以统计分析处理模块最为复杂，当 DSP 部分有数据到来时，由 DSP 数据读写子系统通过 HPI 总线定时查询方式或中断方式读取 DSP 部分数据，读取数据完成后产生一个向应用业务处理子系统的信号量，应用业务处理子系统接收到信号量后，开始相关的统计分析工作。

DSP 数据读写子系统主要完成对 DSP 板的所有读写操作，具体操作主要包括 DSP 参数设置、DSP 通信与管理、DSP 实时数据读取、DSP 录波数据读取等。

2.5 采用基于嵌入式 Linux 的电能质量在线监测系统的主要特点

(1) 采用嵌入式的 GUI 设计，人机界面友好，显示内容丰富；

(2) 采用分离分层设计，系统稳定性好，功能扩充方便快捷；

(3) MCU 采用 ARM9 来实现，系统运行速度快，能处理更多复杂的业务；

(4) 采用大容量储存，数据可以保存达 40G；

(5) 采用了高速的网络传输，通过结合主台 PC 通信服务器软件来实现秒级数据传输。

2.6 电能质量的技术指标以及嵌入式电能质量监测系统参数

2.6.1 电能质量国标

目前，我国对电能质量研究的主要集中在以下六个方面，并制定和修正了相应的国家标准：

(1) 电压：国家标准《电能质量 供电电压允许偏差》GB/T 12352-1990

(2) 频率：国家标准《电能质量 电力系统频率允许偏差》GB/T 15945-1995

(3) 三相电压不平衡：国家标准《电能质量 三相电压允许不平衡度》GB/T 15543-1995

(4) 电压波动和闪变：国家标准《电能质量 电压允许波动和闪变》GB/T 12326-1990 及国家标准《电能质量 电压允许波动和闪变》GB/T 12326-2000

(5) 谐波：国家标准《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14543-1993

(6) 暂时过电压和瞬态过电压：国家标准《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》GB/T 18481-2001

2.6.2 基于 Linux 嵌入式电能质量在线监测系统的主要性能

(1) 基本精度：0.2%，16 位 A/D 采样，DSP，自动校准，温度补偿；

(2) 电能计量精度：0.2%；

(3) 基本参变量精度: 基波电压 0.2%, 基波电流 0.2%, 基波频率 0.02 Hz, 基波电压(电流)之间相位精度 0.5°;

(4) 谐波精度: 0.2%, 电压: $U_h \geq 1\%U_N$, 允许误差 $5\%U_h$; $U_h < 1\%U_N$, 允许误差 $0.05\%U_N$; 电流: $I_h \geq 3\%I_N$, 允许误差 $5\%I_h$; $I_h < 3\%I_N$, 允许误差 $0.15\%I_N$, 符合国家标准《电能质量 公用电网谐波》GB/T14543-93 规定 A 级测量精度;

(5) 最大频率测量范围: 0~32 kHz;

(6) 电压: 电压测量范围: 0~400 V;

(7) 电流: 额定电流, 3*1 A, 3*5 A; 测量范围, 0~600 A;

(8) 基波频率: 额定频率: 50 Hz 或 60 Hz, 频率范围: 45~65 Hz;

(9) 相位: 相位精度, 0.2%, 相位测量范围 0~360°;

(10) 电源电压: PT 供电与辅助电源供电互为备用, 主、辅电源优先供电方式可选。当主电源失电后, 自动转入辅助电源供电, 电源的切换不影响装置的正常运行;

PT 供电电压范围: 40~400 V;

辅助电源电压范围: AC/DC: 75~300 V

(11) 环境条件

参比温度: 23°C ± 2°C; 参比湿度: 40%~60%

温度范围: 规定的工作范围: -25°C~55°C, 极限的工作范围: -35°C~65°C, 存储和运输范围 -40°C~70°C

相对湿度: <95%(无凝露)

3 结论

把支持微处理器内核的 Linux 嵌到 ARM 中, 然

后通过 Linux 内核支持 TCP/IP 网络协议和基本网络通信协议, 利用嵌入式操作系统对底层硬件和网络协议的支持, 在此基础上设计出的电能质量监测仪具有测量精度高、管理功能强大、组网安装方便、人机交互直观等特点, 并且能够实现高速的网络传输, 能够很好地满足电能质量监测仪的数据实时性、传输高速性和高可靠性的要求, 而且开发周期短、系统适应性强。

参考文献

- [1] Neil Matthew Richard Stones. *Beginning Linux Programming, 2nd Edition*, 《Linux 程序开始 (第二版)》[M]. Published by Wrox Press.
- [2] 王学龙. 嵌入式 Linux 系统设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [3] 邹思铁. 嵌入式 Linux 系统设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] Daniel P. Bovet & Marco Cesati. 深入理解 Linux 内核[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [5] Alessandro Rubini & Jonathan Corbet. Linux 设备驱动程序[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] Steve Furber. ARM Soc 体系结构[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [7] DAVID M. DIKEL, DAVID KANE, JAMES R. WILSON. 软件架构——组织原则与模式[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 李林功, 李华玲. 嵌入式系统的构成与特点[J]. 电测与仪表, 2003.

收稿日期: 2008-05-27; 修回日期: 2008-11-10

作者简介:

张言权 (1973-), 男, 本科, 工程师, 主要从事继电保护管理及维护; E-mail: monosy@126.com

张胜宝 (1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护管理。

(上接第 62 页 continued from page 62)

ZHANG Yi-ning, SUONAN Jia-le, JIAO Zai-bin. Data Synchronization Method for Current Differential Protection Using Fiber Optic Self-cure Ring Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 44-49.

- [9] 吴云, 雷雨田. 光纤保护通道配置[J]. 电力系统通信, 2003, (9): 11-14.

WU Yun, LEI Yu-tian. Telecommunication Channel Scheme of Protection Based-on Optical Fiber[J]. Power System Communication, 2003, (9): 11-14.

- [10] 孙学康, 毛京丽. SDH 技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.

SUN Xue-kang, MAO Jing-li. SDH Technology[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2002.

- [11] 梁芝贤. 利用光纤通道传输保护信号[J]. 电力系统通信, 2005, 26(148): 69-72.

LIANG Zhi-xian. Utilizing Optical Fiber Channel to Transmit Protection Signal[J]. Power System Communication, 2005, 26(148): 69-72.

收稿日期: 2008-05-09; 修回日期: 2008-06-25

作者简介:

秦文萍 (1972-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力系统微机保护和稳定运行; E-mail: qinwenping1027@163.com

郝永晶 (1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统微机保护工作;

刘毅敏 (1974-), 男, 学士, 高级工程师, 长期从事电力系统微机保护工作。