

文章编号: 1005 - 0523(2009)03 - 0058 - 06

基于 DSP 的馈线终端装置 FTU 的设计与实现

刘仕兵

(华东交通大学 电气工程学院, 江西南昌 330013)

摘要: 配电自动化是提高供电可靠性和供电质量的有效手段, 馈线自动化是配电自动化系统的重要内容之一, 而馈线终端装置(FTU)又是馈线自动化的关键智能设备, 是其基础控制单元。随着近年来检测及嵌入式技术的飞速发展, 对 FTU 的系统可靠性和运算精度提出了更高要求。在借鉴当前国内各厂商的 FTU 设计方案的基础上, 研制了以 DSP 为硬件核心的 FTU, 使用交流采样原理实现对电网电压、电流的测量, 根据交流采样值计算得出电流、电压有效值、有功功率和功率因数等电参数, 并具有多种录波功能。软件基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 实时操作系统, 提高了系统模块化和可扩展性。

关键词: FTU; DSP; $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$

中图分类号: U224.3+1

文献标识码: A

馈线自动化系统, 简称 FA 系统, 是配网自动化系统的一个子系统。它除具有 RTU 的四遥功能外, 还具有故障信号(相间短路、单相接地)捕捉能力, 结合一次开关(断路器、负荷开关、箱式变压器、环网开关柜等)组网配合, 可以完成馈线的故障诊断、故障区段隔离和非故障区段的正常供电, 另外, 还具有故障录波等功能^[1]。

馈线自动化系统尽管可以作为一个独立的系统存在, 但它一般都是集成到 SCADA 系统里, 是运行在 SCADA 系统之上的一个高级应用软件。馈线终端装置 FTU(Feeder Terminal Unit)是馈线自动化系统的基本单元, 起着链接开关和 SCADA 系统的桥梁作用, 是用于实现对馈线电参数进行数据采集和控制配电开关的自动化设备。要提高配电网的自动化水平, 关键在于提高馈线终端单元 FTU 的性能。随着数字信号处理技术 DSP 的日益发展和普及, 将先进的 DSP 应用于 FTU 设计, 可实现集遥测、遥信、遥控、保护和通信等功能于一体的新一代微型馈线自动化远方终端 FTU。本文通过一个典型的 FTU 的设计方案, 说明应用 DSP 技术的设计思路和实现方法。

1 FTU 基本功能

(1) 遥信功能: FTU 能对柱上开关的当前位置、通信是否正常、储能完成等情况等重要状态进行采集, 对于状态量变化的反应时间要小于 1 s。

(2) 遥控功能: FTU 接受远方命令控制柱上、信号楼内或箱变内的高低电压负荷开关的分闸、合闸。开关分/合闸操作时间应小于 2 s, 并具有返校功能。

(3) 遥测功能: FTU 采集馈线的电压、电流、有功、无功、功率因素、相序等电参数, 此外还要根据需要增加测量零序电流、线电压等这些反应系统不平衡程度的电参数。

(4) 统计功能: FTU 能对开关的动作次数和动作时间进行统计和监视。

(5) 故障检测: FTU 够检测故障, 并上传故障信息, 如欠压、过压、过流等, 采集的故障信息一般要包括故障电流、电压值, 故障发生时间等, 为便于分析故障, 可记录故障电压、电流的波形。

(6) 自检和自恢复功能: FTU 具有自检测功能, 并在设备自身发生故障时及时报警; 具有可靠的自恢复功能, 一旦受干扰造成死机, 可以恢复正常运行。

(7) 远方/当地控制选择功能: FTU 具有远方/当地控制方式选择功能, 以防止误操作造成的事故, 提

收稿日期: 2009 - 03 - 22

基金项目: 江西省教育厅科技项目(QJJ09223)

作者简介: 刘仕兵(1970 -), 男, 湖北麻城人, 副教授, 硕士, 研究方向为交通信息工程及控制。

高系统安全性。

由于被监控的设备不同、应用要求不同,FTU 的功能的要求也不尽相同,实际工程中,要根据具体情况对这些基本功能进行取舍^[2]。

2 系统设计

2.1 系统硬件设计

FTU 硬件部分是整个控制系统的基础,其性能好坏对控制系统控制功能的实现至关重要。本文设计的 FTU 集遥测、遥信、遥控等功能于一体,并在测量精度、实时性、快速性、通信的可靠性和电磁兼容性方面有较高的要求。FTU 的设计逐渐向智能化发展,所以将 DSP 芯片作为 FTU 的主控制芯片,可以实时、有效地处理馈线的各种数据,通过特定的算法和控制,给出相应参数,且与必要的调度管理软件相配合,实现馈线的正常监视及故障的保护、定位等。本系统采用了模块化的设计思想,各模块配置与扩展都很方便,其系统硬件结构如图 1 所示^[3]。

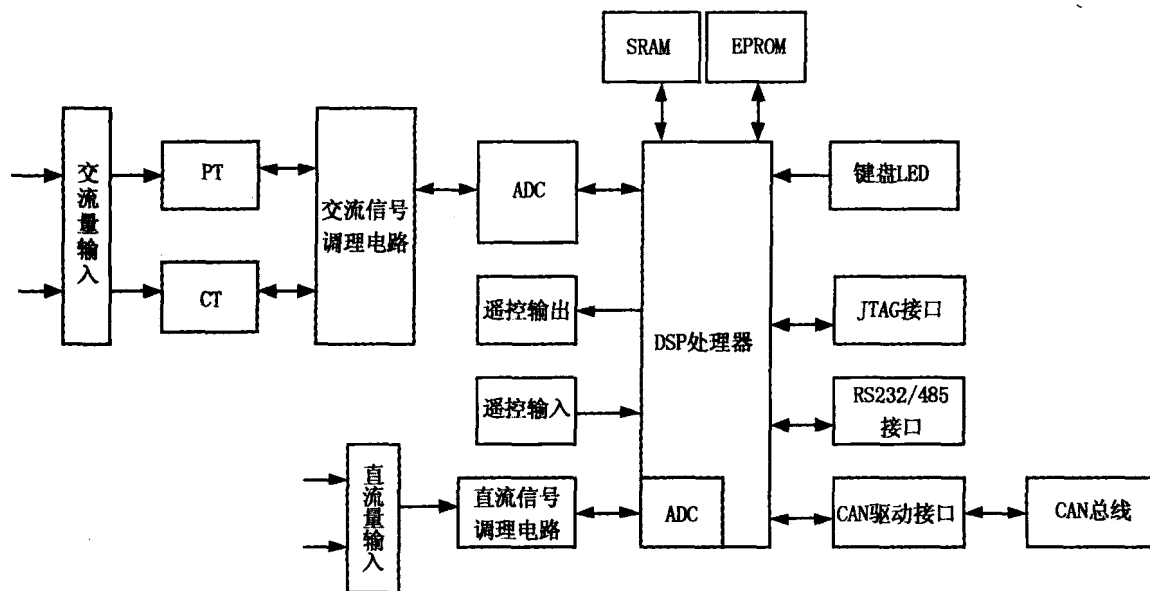


图 1 系统硬件结构图

如图 1 所示,整个硬件部分主要可分为以下几个功能模块:

- (1) TMS320LF2407A 处理器及其最小系统;
- (2) 交流量输入调理及转换部分;
- (3) 直流量输入调理及转换部分;
- (4) 遥控输出部分;
- (5) 遥信输入部分;
- (6) 通信部分。

1) TMS320LF2407A 处理器及其最小系统

由于数据处理的实时高速要求,以及算法的要求,并考虑成本,采用数字信号处理(DSP)芯片作为 FTU 的核心处理器。DSP 是一种能够实时快速地完成各种数字信号处理算法控制的微处理器,可广泛地应用于通信、雷达、声纳、语音和图像处理等领域。

DSP 内部有高达 32K 字的 FLASH 可程序存储器,对一般的应用足够,所以在硬件上没有外扩程序存储器;但片上仅有非常有限的数据/程序 RAM(1.5K 字),必须扩展。扩展的 SRAM 选用 IS61LV6416,其特点在于:

- (1) 容量大,高达 64 K 字;
- (2) 高速访问时间,最低可达 8 ns;
- (3) 低功耗,工作功耗 250 mW,静态功耗近 250 μ W;
- (4) 采用 3.3 V 电源,与 DSP 电源相同,无需额外电源;
- (5) 动态操作,无需时钟或更新电路,与 DSP 的接口简单。

最小系统是 FTU 的核心模块,从硬件上看,主要有程序存储器和数据存储器的扩展电路、时钟电路、用于编程调试的 JTAG 接口电路以及其他信号的控制电路。由于 DSP 内部有基于锁相环的时钟发生器模块,所以要产生 40 MHz 的系统时钟频率,只需外部提供 10 MHz 的基准频率,即可使 DSP 工作在 5 ~ 40 MIPS,初始化时设置相关寄存器来修改倍频或分频系数。读写控制线 R/W 和外部地址总控制线/STRB 共同构成对外部地址的访问控制。/PS、/DS、/IS 分别用来控制对外部程序存储空间、数据存储空间和 I/O 存储空间的访问。

用来与 CCS 通信进行系统调试的接口为 JTAG 口。DSP 的相关管脚为 EMU0、EMU1、TDI、TDO、TCK、TMS 和 TRST。

2) 交流信号调理及 AD 转换电路

遥测的主要测量对象是电网上的三相交流电压以及电流等信号,这些信号的幅值都很大,而一般的采集系统只能转换小电压信号,故不能直接测量。考虑到电磁兼容性能,输入线路与装置内部线路之间电气上必须隔离,因此,可将各种待采集信号线性转换为数据采集系统可以接受的小电压信号,并提供电气上的隔离。通常可选择测量型 PT 和 CT 实现此功能,在高精度的 AD 采样电路中,为使输入的模拟信号与 AD 采样所需求的信号相匹配,通常在 AD 采样电路前端加入调理电路,以缩小和平移要采样的信号,从而使调理后的信号适合 AD 转换器的模拟输入要求,把模拟量变成 AD 转换器可以接受的电压范围,然后进行模数转换。以电压调理电路为例,如图 2 所示。

来自 PT、CT 的交流电压、电流信号经 RC 滤波,再经运放连接到 AD 转换器的输入端上进行模数转换,在本文所设计的 FTU 中,用一片 MAX125 来完成模拟量输入采样转换。

3) 直流信号调理及 AD 转换电路

除了交流模拟信号的测量外,FTU 还要对直流模拟信号进行转换,通常用于监视

FTU 电源电压及蓄电池电压,以实现电源管理模块的采集功能。由于 PT、CT 无法传输直流分量,此时用于交流信号调理的方案就无能为力了。直流模拟信号隔离的一个较好的选择是使用线性光耦。线性光耦的隔离原理和普通光耦没有什么区别,只是将普通光耦的单发单收模式稍加改变,增加了一个用于反馈的光接受电路用于反馈。这样,两个光接受电路都是非线性的,但两个光接受电路的非线性特性都是一样的,就可以通过反馈通道的非线性来抵消直通通路的非线性,从而实现线性隔离的目的。

4) 遥信输入电路

遥信输入电路主要完成状态信号的输入,在本文设计的 FTU 中有 16 路遥信输入,遥信状态信号主要来自柱上开关的分/合状态、远方/当地状态、蓄电池投入状态、外部电源失电等。

遥信原理图如图 3 所示。由于遥信作为信号源时本身的干扰就比较大,而且它的距离一般都比较远,沿途干扰比较大,所以遥信一般都要采用隔离措施。本方案使用光耦(TLP521-4)来实现此功能,从电路上把干扰源和易干扰的部分隔离开来,使遥信前端电路和后端电路仅保持信号联系,但不直接发生电的联系,隔离的实质是把引入的干扰通道切断,从而达到隔离干扰的目的。光耦隔离后的信号输入运放(LM339)正极,负极则接由可调电阻 R3 调制的阈值电压,该运放工作于饱和状态,即当遥信信号高于阈值

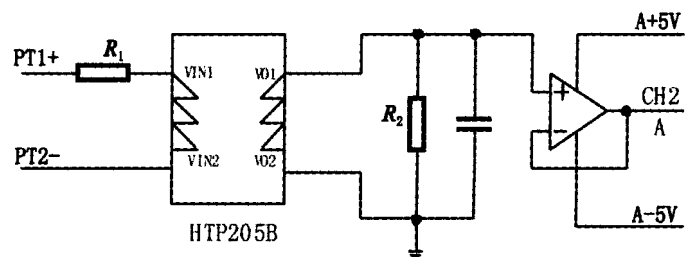


图 2 电压调理电路

电压时,输出为 +5 V,反之输出为 -5 V。图中前端输入回路中的反向二极管用于反接电压时起到保护作用,电阻 R1 起到限制电流的作用,滤波电容可以防止高频信号的干扰。需要注意的是光耦隔离的输入端和输出端要使用不同电源供电,本设计采用 B0505S 隔离变压器模块。限流电阻 R1 的取值要合适,R 过大,光耦不能可靠导通,反之易造成前端反向二极管损坏或缩短光耦寿命,本设计方案选择前端限流电阻为 30 k/1W。

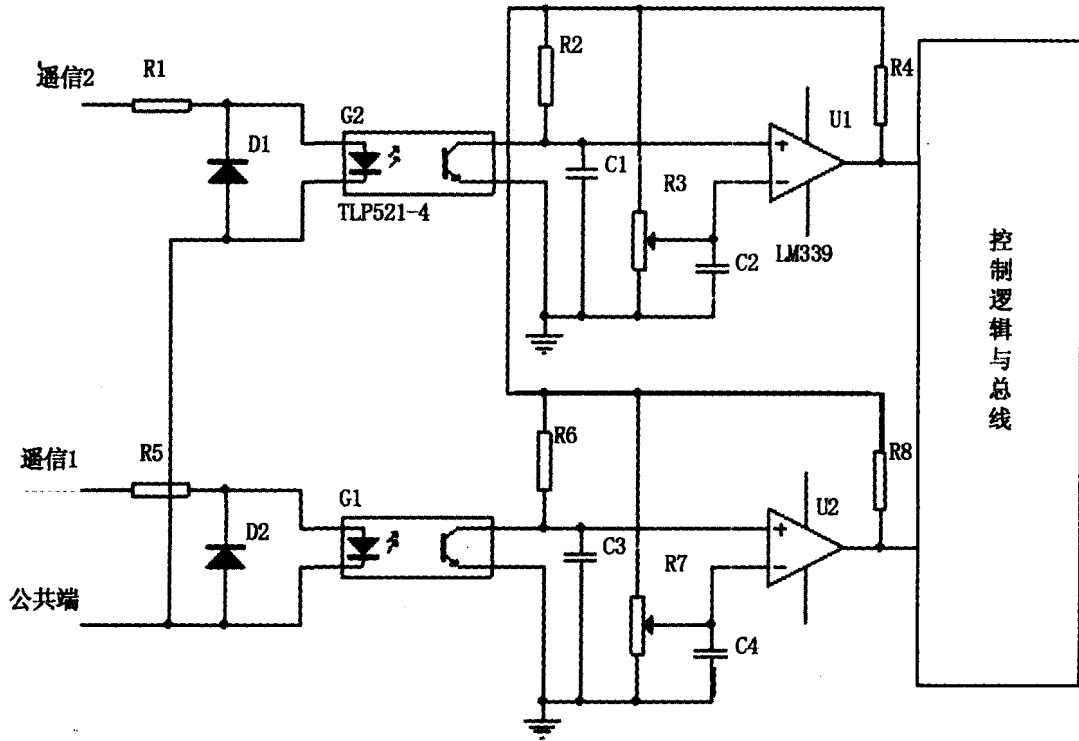


图3 遥信原理图

总线控制逻辑电路中每 8 路接入一片 74LS244 驱动输出,74LS244 使能端由地址译码器 74LS138 提供时能信号,这样可用最小的 IO 口扩展更多的遥信路数。

5) 遥控输出电路

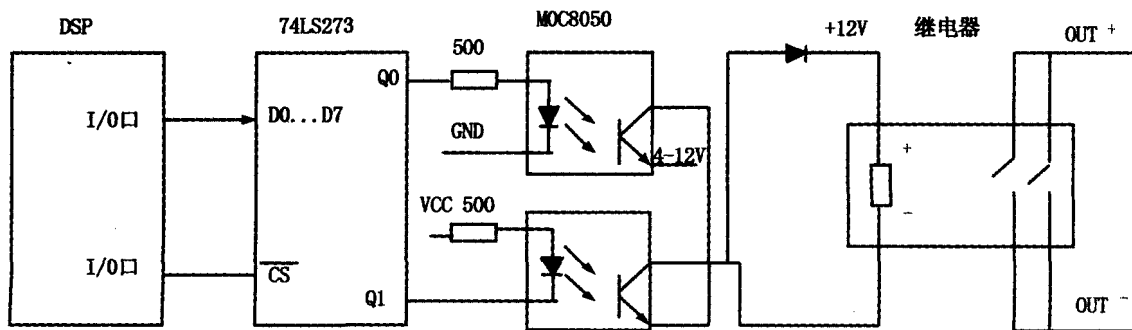


图4 遥控示意图

FTU 遥控输出接口电路示意图如图 4 所示,给出其中一路的示意图。图中 DSP 的 I/O 口输出 8 个控制信号,每 2 个信号控制一路继电器输出,共可控制 4 路继电器输出。设 DSP 输出一对控制信号经 74LS273 芯片锁存后的信号为 Q0 和 Q1,由电路图可知,当 Q0 为高电平“1”且 Q1 为低电平“0”时,继电器吸合,当该控制信号为其它组合时,继电器均处于断开状态。这样可减少遥控误动作的可能,提高遥控准确率。

6) 通信接口设计

馈线自动化系统的通信可分为三层,即主站层、配电子站层、终端层,主要包括馈线远方终端(FTU)与配电子站之间以及配电子站与配电主站之间的通信。配电子站负责收集 FTU 上传来的信息、向 FTU 下传信息并实现馈线故障的自动判断,配电主站负则责处理配电子站的上传信息。

FTU 的一个重要的功能就是与上级子站进行通讯,包括远方实时检测和控制、远方读取和修改整定值、远方遥控开关及记录各种操作和故障信息、故障及手动录波文件上传等功能。因此选择合适的通信方式是设计 FTU 的一个重要工作,在本系统中,综合各方面的因素,决定采用 CAN 总线作为 FTU 与上级子站的远程通信接口,通信介质为屏蔽双绞线,采用 CAN2.0B 协议,以 RS232 接口作为当地通信接口,用于现场调试以及与其他邻近智能设备的通信^[4]。

2.2 系统软件设计

在软件设计上,基于实时多任务操作系统 uCOS-II 作为软件运行平台,软件模块化,为今后扩展功能模块或移植到其他硬件环境提供了一个通用的软件平台;针对其交流采样特点,合理分配任务,保证各项任务协调运行,提高了整个系统的稳定性和实时性^[5]。

嵌入 uC/OS-II 后,FTU 的 main() 主程序所完成的功能仅仅是对整个硬件模块的自检和初始化,对操作系统的初始化及各个任务和用于任务同步所需信号量的创建,全局变量的初始化,然后启动操作系统,此时 CPU 的控制权交给操作系统管理并在正常运行中永远不会返回,除非发生复位重启。

主程序流程如图 5 所示。

AD 采样是在定时器的周期中断中完成的。通过频率测量电路获得电压频率,并 32 分频获得的频率值反馈作为定时器的周期寄存器。定时器产生周期中断,并在中断服务程序中转换 MAX125 并读取转换值。

通信软件包括 CAN 底层驱动和应用层。底层驱动包括 CAN 报文的接受和发送处理。应用层需要通过 CAN 传输信息时,直接调用底层驱动发送函数,信息发送函数将报文封装成符合 CAN 协议的帧结构,并置于发送缓冲区,然后由 TMS320LF2407 内置的 eCAN 控制器完成整个发送过程。

3 测试结果分析

查看结构体 pFTUData -> RMS_Data 中存储的电压电流有效值计算结果。用万用表对不同时段输入电压电流进行测量,以此作为真实值和测量值相比较,比较结果见表 1 所示。

由表 1 结果可看出,本装置对有效值的测量具有较好的精度,由此推算出来的有功功率、无功功率、功率因素同样具有较好的精度,这里不一一复述。本装置在浙赣线南昌铁路局管段电力远动系统中投入应用,效果良好。

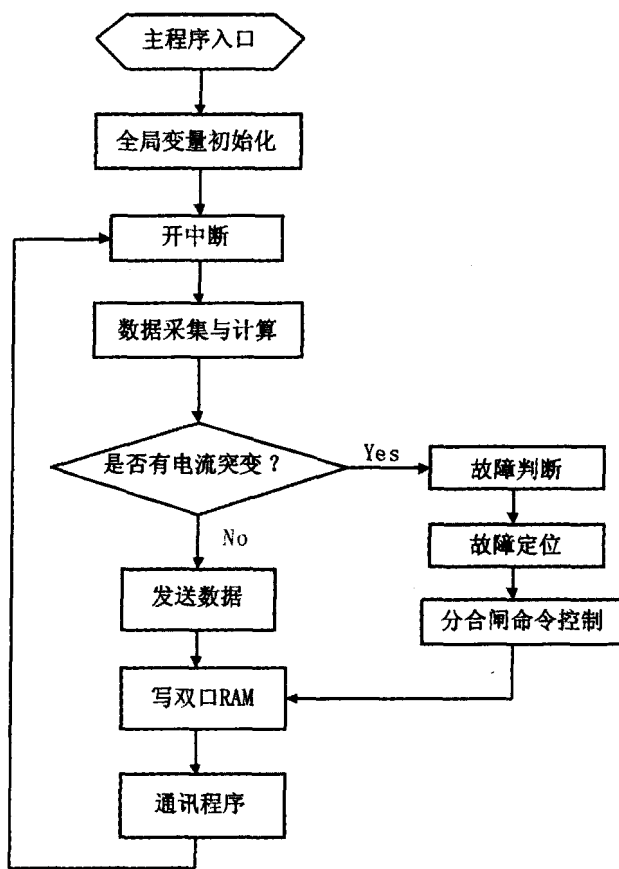


图 5 系统软件主程序框图

表1 电压、电流实际值和测量值比较

电网电压/V	测量电压/V	绝对误差/V	相对误差/%	电网电流/A	测量电流/A	绝对误差/A	相对误差/%
221.5	220.3	-1.2	0.54	5.3	5.1	-0.2	3.77
183.7	183.2	-0.5	0.27	10.7	10.9	+0.2	1.87
52.1	52.3	+0.2	0.38	13.2	12.8	-0.4	3.03

4 结语

FTU 实际上是一种非常典型的嵌入式系统。实测证明,采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 大大提高了系统的实时性,特别是提高了遥信处理和保护处理等较高优先级任务的响应速度。在满足系统对实时性的整体要求的基础上, $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 所采用的基于优先级的调度策略可以最大限度地满足最关键的任務,如遥信变位处理的响应时间远小于部颁标准。同时以 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 作为整个软件体系的基础,非常方便应用软件的模块化设计。

FTU 的设计逐渐向智能化发展,故障定位、隔离、线路恢复将是以后 FTU 设计智能化的一个重要方面,融合了保护功能的 FTU 更能适应将来配电自动化发展的需求。研究基于 DSP 技术的 FTU,充分发挥了 DSP 快速强大的运算处理能力,切实满足电力系统监控的实时性和复杂性的要求,对配电自动化的发展具有重要的现实意义^[6]。

参考文献:

- [1] 肖宛昂,曾为名.如何用 C 语言开发 DSP 嵌入式系统[J].单片机与嵌入式系统应用,2003,23(1):81-84.
- [2] 费远鹏.DSP 在馈线终端装置中的应用与研究[D].南昌:华东交通大学,2007.
- [3] 申 斌.馈线远方终端之 CPU 模块的研制[D].济南:山东大学,2005.
- [4] 邓 凌.基于 DSP 的馈电线终端设备的研制[D].杭州:浙江大学,2005.
- [5] 江 海. $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 和 MODBUS 通信协议在 TMS320LF2407A 上的移植与应用[J].自动化与仪器仪表,2004,20(1):64-68.
- [6] 王 碧.一种基于 FTU 的馈线自动化系统[J].电力与能源,2008,6(4):302-303.

Design and Realization of Feeder Terminal Unit Based on DSP

LIU Shi-bing

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Distribution Automation is an effective means to improve the reliability and energy quality of power supply. Feeder Automation is one of the important contents in the distribution automation, and Feeder Terminal Unit (FTU) is key intelligent equipment and basic control unit of the feeder automation. In recent years, with the rapid development of detection and embedded technology, higher requirement of reliability and accuracy of FTU is needed.

In this paper, based on the design of many manufacturers, the FTU using DSP as the hardware core is designed. It uses AC sampling theory to measure voltage and current of electrical network, uses AC sampling value to calculate virtual value of voltage and current, power, power factor and other electrical parameters, and has several wave record functions. Based on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$, the software enhances modularization and expansibility of the system.

Key words: FTU; DSP; $\mu\text{C}/\text{OS-II}$

(责任编辑:王建华)