

电能质量监测系统中 基于 Modbus RTU 的多机通信

李 娟,张 波,丘东元
(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: 电能质量检测与无功补偿相结合是未来发展的趋势,它的关键技术之一是数据通信。研制了一套基于数字信号处理器(DSP)的电能质量检测与无功补偿综合测控系统,该系统采用 Modbus RTU(远动)报文格式,通信协议支持传统的 RS-232、RS-422、RS-485 及 Ethernet 设备,实现了以单片机为主机、DSP 与 PC 机为从机的多机通信。主机 89C 51 采用中断方式进行数据发送与接收,并采用模块化的方法编程实现,DSP 与 PC 机为从机,完成报文接收、处理、成帧及发送功能。同时依据通信规约设计了相应的通信接口,有效地解决了多机通信引起的电平冲突,实现了主机与从机的点对点通信。

关键词: 电能质量监测; Modbus; 多机通信
中图分类号: TM 93;TN 91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)01-0093-04

0 引言

随着社会进步和技术发展,大量冲击性负载,电力整流、换流设备以及其他电力电子设备在各工业部门和电力系统中的广泛应用,给电网带来了诸如谐波干扰、功率因数低、三相不平衡等严重的电网污染,极大地影响了电力系统的安全经济运行。

国外研制的电能质量监测设备根据使用的场合,主要分为便携式和固定式。便携式主要用于工作现场的测量、线路的巡查和监测大型用电设备如电炉、轧钢机等对电网的谐波污染;而固定式主要应用于电网各个节点,对电网电能质量进行检测^[1-4]。

在国内,近几年对此类产品也作了一定的投入和开发,并且已有部分产品应用到实际工程中,如电厂、大型变电站等电力系统中的主要节点^[5-7]。

本文以改善电网供电质量、补偿无功功率为背景,研究开发了一套基于数字信号处理器(DSP)TMS 320C2407A(简称 2407A)的电能质量监测与无功补偿综合测控装置,其中确定并实现上下位机间可靠、高效的数据通信是实现整个电能质量实时监测系统的关键。所研制出的便携式电能监测系统数据通信部分采用单片机 89C 51 作为主控单元以实现多机和分布式控制。由于标准 51 单片机内部仅含有一个可编程的全双工串行通信接口,本装置在不增加硬件资源的基础上,将 Modbus 协议应用到多机通信模块,根据装置监控的数据类型及传输特点,设计了完整的通信规约,并结合相应的软硬件设计,实现了简单、可靠、稳定的多机通信。

1 Modbus 通信协议及其设定

1.1 Modbus 通信协议及 RTU 报文格式

Modbus 协议的通信格式主要有 ASCII、RTU、TCP 等,其中 RTU 格式由于传输效率高而被广泛采用^[8],Modbus RTU 数据传送模式的消息中的每个 8 位字节包含 2 个 4 位的十六进制字符。一个完整的 Modbus RTU 数据包括 1 位地址位、8 位数据位、1 位奇偶校验位、1 位停止位及 1 位错误校验位。

此协议支持传统的 RS-232、RS-422、RS-485 和 Ethernet 设备。控制器设备数据通信使用主从技术,在同一通信网络中每个设备都有唯一的设备地址,并且只能有一个主机,可以有多个从机。主机发出数据请求消息,从机根据主机发出数据请求消息作出相应反应。主机可单独与从机通信,也可以广播方式和所有从机通信。如果单独通信,从机返回消息作为回应,如以广播方式查询,则不作任何回应^①。Modbus 通信协议 RTU 信息帧格式如表 1 所示。

表 1 Modbus RTU 信息帧结构
Tab.1 Field contents in modbus messages

起始位	地址码	功能代码	数据区	结束位	校验码
$t_1-t_2-t_3-t_4$	8 位	8 位	$n \times 8$ 位	$t_1-t_2-t_3-t_4$	16 位

其中 $t_1-t_2-t_3-t_4$,表示 4 个字符的传输时间,地址码为被查询的从机地址,它所表示的从节点的有效地址范围是 0~247,其中 0 表示广播地址。

功能代码为 8 位,有效编码为 1~FF H,用于说明从节点要完成的功能。作为从机响应,从机发送的功能码与从主机发送来的功能码一致,并表明从

机已响应主机进行操作。

数据区包含需要从机执行什么动作或由从机采集的返送信息。响应数据域包括本帧数据域的字节数量和字节数,这些数据可以是 I/O 值、状态数据或其他测量控制信息。

错误校验采用 CRC16(循环冗余)校验,包含 1 个 16 位的二进制值(由 2 个 8 位字符实现)。信息帧以连续的数据比特流进行传输,CRC 校验从地址码开始对报文帧的所有数据进行校验。从机接收完毕后,生成接收数据(CRC 码除外)的 CRC 校验码,并与主机发送的 CRC 码比较,若相同则认为接收正确。

在 RTU 模式中,完整的一帧消息开始传输时,必须与上一帧消息之间有 3.5 个字符的时间间隔,这样接收方才认为该帧是一个新的数据帧。在一个数据帧传输过程中,帧中的每个字符之间的时间间隔不能超过 1.5 个字符时间,否则,本帧会被视为无效帧,但接收方仍然会等待并判断下一次 3.5 个字符时间间隔之后出现的新一帧。

1.2 通信规约及报文交换

根据装置的监控数据类型及传输特点,设计如下的通信规约。

通信格式在通信为异步时,1 位起始码,8 位数据位,1 位停止位;通信速率为 9 600 bit/s;通信方式采用一对一(或一对多)主从方式;通信协议为 Modbus RTU。地址码为从机地址,设 DSP 为 01,PC 机为 02,命令字为从机执行的功能。发送地址码之后单片机等待应答,收到返回应答信号后,发送命令码。数据区在下行命令时为地址索引,上行命令时为主机所要求的数据。

单片机收齐数据后,如校验长度与上传数据的长度不符时,则表明数据传送过程中因干扰而插入错误数据或丢失数据,因此丢弃该帧数据并要求重发。该通信规约符合中华人民共和国电力行业标准远动设备及系统传输规约第 101 篇《基本远动任务配套标准》^[9]。

2 通信接口设计

以单片机 89C51 为核心的数据采集控制系统负责对电能质量实时监测系统的数据接收后,写入 Flash 芯片 K9F1GU0b^①进行永久保存,并在收到上层软件请求后将 Flash 中数据传送给 PC 机。

DSP 主要负责电网数据的采集存储,而数据的进一步处理、分类由 PC 机实现,即由相应的上位机通信软件进行数据接收、显示,形成数据报表和趋势图,并打印输出。

单片机作为主机,DSP 及 PC 机作为从机并共用单片机串口,由于单片机只有一个全双工串行接收发送口,因此对于主从机间的数据通信会有冲突,本装置采用多机通信协议解决这个冲突,同时研发了相应的硬件接口电路,通过软硬件设计,最终实现了单片机与从机的点对点通信。

图 1 为 89C51 与 2407A 的通信接口电路,由于 2407A 采用 3.3 V 供电,因此在 89C51 与 2407A 之间加入线性光耦 PC817 以实现电平匹配与隔离,整个接口电路简单、可靠性高。

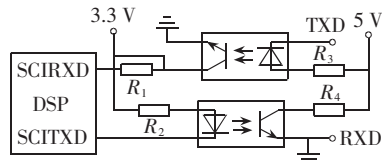


图 1 MCU 与 DSP TMS320LF2407A 的通信接口电路

Fig.1 Communication interface between MCU and DSP TMS320LF2407A

单片机 89C51 在结构上为 RS-232 异步通信提供了良好的条件,其与 PC 机接口硬件电路设计如图 2 所示。

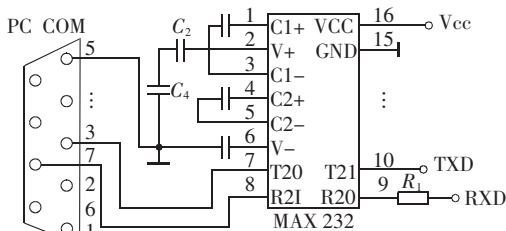


图 2 MCU 与 PC 机的硬件接口

Fig.2 Communication interface between MCU and PC

该电路采用了符合 RS-232 标准的驱动芯片 MAX232 进行串行通信。这里 MAX232 的接收脚 R20 不直接到 89C51 的 RXD 接收脚,而是通过一个 750 Ω 的电阻 R_1 ,这样可有效防止 PC 机与 DSP 共用单片机串口引起的电平冲突。

3 通信过程

3.1 2407A 内置 SCI 模块

2407A 是高性能 16 位定点运算 DSP,其串行通信接口(SCI)支持 CPU 与其他采用标准 NRZ(不归零)格式的异步外设间的数字通信^②。

串行通信接口模块提供了与许多通用异步接收/发送通信外设的接口。串行通信接口模块有 2 个多处理器通信协议,空闲线多处理器模式和地址位多处理器模式。空闲线多处理器模式在地址前留有一个固定空间,没有附加的地址/数据位,它应用于典型的非多处理机 SCI 通信,而地址位多处理器模式,在每个字节中加入一个额外位(地址位)来将地址同数据区分开,使数据块之间不用等待,因而在处理多个小数据块时更有效。本装置即采用地址位多处理器模式实现有效的多机通信。

DSP 采用地址位多处理模式,初始化时,将 DSP 的 SLEEP 位设置为 1,使它仅在检测到地址位时才

① 128M $\times$ 8bit/64M $\times$ 16bit NAND Flash Memory. Samsung Electronics Co.,Ltd, 2003.

② TMS320LF/LC240Xa DSP Controllers System and Peripherals. Texas Instruments, 2001.

发出中断,在中断服务子程序中,将处理器读取到地址与本机地址比较,若相同则程序清除 SLEEP 位,否则 SLEEP 位保持置位^[10]。

3.2 通信过程

主机程序主要完成串口通信设置及协议实现 2 个功能。主机通信过程包括:Modbus 通信初始化、报文成帧、报文发送、报文接收、报文处理等。其具体通信流程如图 3 所示。

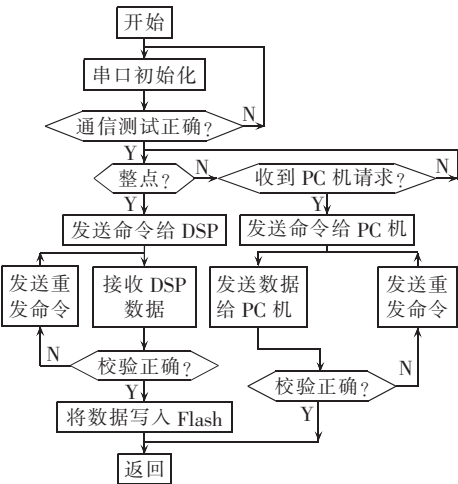


图 3 主机通信流程图

Fig.3 Flowchart of the master communication

主机程序采用中断方式发送与接收数据,同时采用模块化的方法编程实现。主机首先对 Modbus 通信初始化,利用时钟芯片 PCF 8583 进行整点判断,将其设置为定时起闹模式,间隔为 1h,如为整点,则产生中断,此时主机发送命令给 DSP 要求发送整点数据,每日零点,同时发送电网参数的日极值。

整点、极值数据均由 DSP 采集记录。单片机收齐数据后进行校验,如接收正确则将数据写入 Flash 芯片永久保存,否则发送重发命令要求重发,如时钟芯片判断非整点,则等待 PC 机请求,发送数据给 PC 机,数据经上层软件还原、整理存入数据库,同时以曲线显示、打印输出。为了保证主机正确接收 DSP 发送的整点数据,因此在整点时刻不接收 PC 机上传数据的请求。

从机通信与主机通信相似,其通信过程是接收报文、报文处理、发送报文成帧、发送报文等,接收和发送均采用中断方式。从机通信流程如图 4 所示。

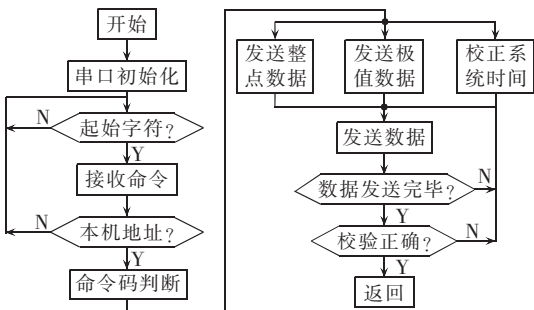


图 4 从机通信流程图

Fig.4 Flowchart of slave communication

从机完成串口初始化后,等待命令,正确判断起始字符后,开始接收地址码,如非本机地址则不响应,如为本机地址则回复一个响应消息,解析命令码并根据命令码执行不同功能。

从机通信软件采用一个定时器计算起始字符时间,定时器设置为 0.5 个字符时间,同时设置 2 个变量作为字符时间计数器,在定时器中断程序中,只要分别将 2 个变量不断累加并判断其是否达到 7 和 3。

计算 CRC 校验码时,首先将 1 个 16 位 CRC 寄存器置“1”,并设 1 个 16 位的 CRC 因子,将接收到的第 1 个字节数据与 CRC 寄存器低字节相异或,然后将 CRC 寄存器右移 1 位,最高位补“0”,若移出的最低位为“1”,则再将 CRC 寄存器与 CRC 因子异或,如此循环 8 次即完成 1 个字节的 CRC 校验码的生成。若有多个字节则重复以上过程。

4 装置及现场实验

4.1 硬件电路及功能

由以上分析、规划、设计所研制出的样机具有实时监测电网电量、谐波分析、无功功率补偿和故障报警与保护等功能。本装置可实现诸多功能。

a. 累计数据记录功能。可对频率、三相功率因数、电压、电流、有功/无功功率、电容器投切状态、谐波电压、谐波电流进行记录。

b. 统计数据记录功能。可记录频率、三相功率因数、相电压、相电流、有功/无功功率日最大值和最小值及发生时刻;电压超上限、下限时间;每组电容器累计投切次数、每组电容器累计投切时间;三相总有功/总无功电度量、补偿的无功电度量。

c. 参数设置功能。参数设置具有密码保护,设置密码用户可修改,装置可设置的运行参数包括:设备地址、电压互感器及电流互感器的变比、功率因数设定值、输出路数、每组容量、各种报警保护限值、同组电容器投切间隔、不同组电容器投切间隔、系统时间等。

d. 数据通信功能。具有 RS-232 通信接口,通信方式可采用现场通信,用笔记本电脑或掌上电脑经 RS-232 口抄录数据可实现定时召唤或实时召唤,读取实时数据、累计数据、整点数据、统计数据、运行参数,修改运行参数及对电容器的远程控制。

e. 报警和保护功能。当电网某相电压过压、欠压及谐波超限时快速切除补偿电容器;当电网缺相时,快速切除补偿电容器,同时输出报警信号。

4.2 现场调试

样机调试主要分为电量测量精度测试和无功补偿性能测试。采用三相功率源测试样机,其输出电压、电流精确度 $\leq 0.02\%$,频率精确度 $\leq 0.01\%$,相位精确度 $\leq 0.5^\circ$,谐波输出次数为 2~20 次。

将电网参数记录结果与三相功率源设定值对比,

样机的测量精度:电压、电流 $\leq 0.5\%$,频率 $\pm 0.01\text{ Hz}$,电能 1.0% ,其他 0.5% ,均达到较好的测量精度。

此系统投入运行后运行稳定,未出现通信中断,造成停机事故,在正常工作时对于从机的突然停机或是通信线路断开,并不影响通信网络上其他设备的正常通信,而当设备恢复正常时系统会自动接入,并能正常传输数据。

5 结论

本文采用 Modbus 通信协议 RTU 报文格式及相应的硬件接口设计实现了以单片机为主机,DSP 与 PC 机为从机的多机通信,较好地完成了电能质量监测与无功补偿系统的数据传输和通信。

本文设计的装置具有 RS-232 通信接口,现场可通过笔记本电脑或掌上电脑经 RS-232 接口抄录数据。可实现定时召唤或实时召唤,读取实时数据、累计数据、整点数据、统计数据、运行参数,修改运行参数及对电容器的远程控制。并研制了相应的基于 Windows 的数据采集和分析处理软件,通信数据自动生成报表、曲线及棒图。

今后,该测控装置还可在多方面继续发展,如进一步提高系统性能采用更快速、可远距离传输的通信方式,以实现远程数据抄录;将多台测控装置与数据管理单元连接,通过专用通道传至控制中心的监控系统等。

参考文献:

- [1] SU C L, CHEN C F, LU C N, et al. Communication network performance study of a high-tech park power quality monitoring system [C]//Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, Washington, USA; IEEE, 2000; 456-463.
- [2] MACKEN K J P, VANTHOURNOUT K, van den KEYBUS J, et al. Distributed control of renewable generation units with integrated

active filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5):1353-1360.

- [3] HOWLETT R J, WALTERS S D. Multi-computer neural network architecture[J]. Electronics Letters, 1999, 35(16):1350-1352.
- [4] DAPONTE P, di PENTA M, MERCURIO G. A distributed measurement system for power quality monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2):456-463.
- [5] 段成刚, 欧阳森, 宋政湘, 等. 新型在线实时电能质量监测设备的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(2):60-63.
- DUAN Cheng-gang, OUYANG Sen, SONG Zheng-xiang, et al. Design of a new online and real-time power quality monitor[J]. Power System Technology, 2004, 28(2):60-63.
- [6] 黄攀, 姚建刚, 鲁粟, 等. 基于 WebGIS 的电能质量监测系统的设计及应用[J]. 电网技术, 2005, 29(7):52-55.
- HUANG Pan, YAO Jian-gang, LU Li, et al. Design of WebGIS based power quality monitoring system and its application[J]. Power System Technology, 2005, 29(7):52-55.
- [7] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善配电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19):81-84.
- YUAN Jia-xin, CHEN Bai-chao, WAN Li, et al. The method to improve power quality of distribution system by distribution static compensation[J]. Power System Technology, 2004, 28(19):81-84.
- [8] 曹茜, 黄益庄. Modbus 协议在备用电源自投装置通信软件设计中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9):56-58.
- CAO Zhe, HUANG Yi-zhuang. Application of Modbus protocol in communication software design of automatic bus transfer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9):56-58.
- [9] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 634-1997 中华人民共和国电力行业标准远动设备及系统 第5部分 传输规约 第101篇基本远动任务配套标准[S]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [10] 刘和平, 王维俊, 江渝. TMS320LF240xDSP 语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.

(责任编辑:汪仅珍)

作者简介:

李娟(1982-),女,山西太原人,硕士研究生,主要从事电力电子及电力传动研究(E-mail:epjlee@yahoo.com.cn);

张波(1962-),男,福建三明人,教授,博士研究生导师,主要从事电力电子及电力传动研究。

Multi-computer communication based on Modbus RTU in power quality monitoring system

LI Juan, ZHANG Bo, QIU Dong-yuan

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: For the integration of power quality monitoring and reactive power compensation, one of its key techniques is data communication. A DSP (Digital Signal Processor) - based control system integrating power quality monitoring and reactive power compensation is developed. It adopts Modbus RTU (Remote Terminal Units) communication protocol, which supports RS-232, RS-422, RS-485 and Ethernet devices, to realize the multi-computer communication between MCU (Micro Controller Unit) master and DSP or PC slaves. The master, MCU 89C 51, employs interruption subroutines for transmitting and receiving messages, programmed in modularization. The slaves, PC or DSP, perform functions of message receiving, analysis, framing and response. The communication interface is designed accordingly to settle the level conflicts of multi-computer communication and realize point-to-point communication between master and slave.

Key words: power quality monitoring; Modbus; multi-computer communication