

基于 TMS320C6713 的新型多功能 电能质量分析仪设计

熊 静, 吴在军, 胡敏强

(东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 根据电能质量分析的实际需要, 给出基于浮点数字信号处理器 TMS320C6713 的电能质量分析仪的硬件整体实现方案及软件设计思想。着重介绍了 DSP 核心处理模块 TMS320C6713 的功能、特点及设计开发思路。有源滤波模块滤除 50 次以上的高次谐波, 减少了高次谐波的影响; 16 位的 AD 则保证了采样的高精度; 以太网端口可以方便对不同区域电能质量的综合监测。此外, 还介绍了数字电源及模拟电源分开的电源设计方案。最后, 对如何利用 USB 2.0 与 PC 机进行实时波形显示、设备故障录波、间谐波分析等功能拓展进行了探讨。

关键词: 电能质量; DSP; 以太网; USB 2.0

中图分类号: TM 933

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)05-0079-05

0 引言

近年来, 电力电子技术发展迅速, 电力电子器件及电力电子设备应用越来越广泛, 大量的非线性负荷、冲击性负荷的投运, 使公用电网中产生了大量的谐波干扰以及电压扰动、波动和闪变, 电能质量不断恶化。同时, 随着很多对电能质量要求敏感的控制设备、自动化设备越来越广泛地应用于工农业生产及人们日常生活, 对电能质量也提出了越来越高的要求^[1]。因此, 设计一台高精度的电能质量分析装置对监测及分析电网电能质量有着十分重要的意义。

目前, 国内生产的电能质量分析仪大多精度不高, 很多以工控机作为主要结构的产品体积笨重, 功能较单一。国外不乏优秀产品然而价格较高。随着电子技术的发展和网络通信技术的进步, 以 DSP 为处理器的网络化电能质量分析仪已成为发展方向^[2]。

传统的电能质量分析仪大多采用定点 DSP 作为处理内核, 定点 DSP 处理数据时需要时刻关注溢出的发生, 耗费了大量的程序空间和执行时间。浮点 DSP 用硬件实现浮点算法, 动态范围大, 计算精度高, 总线宽, 硬件资源也更为丰富, 较定点 DSP 有着十分明显的优势。未来 DSP 的发展, 浮点 DSP 必将在很多方面取代定点 DSP, 成为工程应用的主流。

本文介绍一种采用浮点 DSP TMS320C6713 (简称 C6713) 为基本结构, 集电能质量分析、设备负荷波动监视、实时波形显示、设备故障录波、间谐波分析等于一体的多功能网络化电能质量分析仪。

1 系统硬件设计

本系统的硬件设计整体结构如图 1 所示。考虑

现场测量时的接线方式既有三相三线制又有三相四线制, 本分析仪数据采集部分设计为 8 通道输入, 即可以满足 $I_a, I_b, I_c, I_0, U_a, U_b, U_c, U_0$ 8 路同时输入。用户可以根据需要选择所需的通道。采集的模拟信号经过有源滤波、AD 转换等过程变为数字信号, 然后由 DSP 读取并进行快速傅里叶变换 (FFT)。

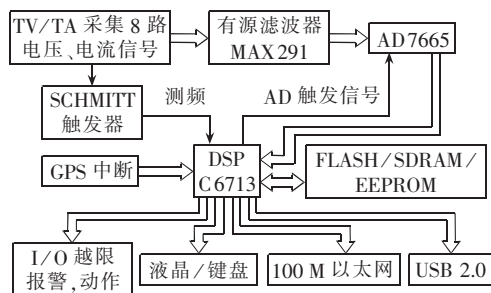


图 1 系统结构框图

Fig.1 The block diagram of system structure

1.1 有源滤波

根据 Shannon (香农) 采样定理, 连续信号的最高频率必须小于采样频率的 $1/2$, 否则将引起频率混叠, 使得数字信号处理不能复原连续信号^[3]。因此, 在进行 AD 转换之前, 必须加模拟低通滤波器。

本装置中选用 MAXIM (美信) 公司的 MAX291, 它是该公司生产的 8 阶巴特沃斯型开关电容式有源低通滤波器, 其供电方式可以选择单电压 $+5V$ 或双电压 $\pm 5V$ 2 种^①。为了扩大滤波器输入信号的电压允许范围, 本系统采用双电源的供电方式。MAX291 的 3 dB 截止频率可以在 $0.1 \sim 25 kHz$ 之间选择。系统设计分析最高达 50 次谐波, 因此选择截止频率为 2.5 kHz。

MAX291 可通过选择时钟控制截止频率。时钟源有内外 2 种^①, 本系统采用内时钟方式, 具体方法

128 MByte^①。本系统将 AD 配置在 CE0,如图 2 所示,地址线 AD[21~12]通过 CPLD 模拟的地址译码器分别产生 2 片 AD 的 CNVST\,CS\,RD\ 等控制信号。FLASH 用作引导 DSP,将其配置在 CE1 空间。外扩 SDRAM 在 CE2,其余如实时时钟、以太网、USB 等均配置在 CE3 空间。C6713 支持 16 个 EDMA (扩展的直接存储器访问)通道,每个通道都可以与相应的一些事件相关联,系统可以由 DMA 控制器完成 DSP 存储空间内的数据搬运,其源/目的可以是片内存储器、片内外设或外部器件^{[6]①}。利用 C6713 的这一功能,系统通过对相关寄存器的设置,由相应的同步事件、中断触发 EDMA 完成数据搬运,大大提高了系统的工作效率。

C6713 支持 2 个 I²C 接口,本装置将其用作外扩 EEPROM。

当系统发生电压异常时,分析仪需自动记录异常电压、电流值,并为异常值打上时标。实时时钟 RTC 将为系统提供时间信息,此外,系统通过 GPS 中断输出整分脉冲对 RTC 进行校时。

利用 C6713 丰富的 IO 口(GPIO),系统设置了多个越限报警装置,并设计可驱动 4 个继电器动作。

1.5 通信模块

1.5.1 串口通信

C6713 有 2 个多通道缓冲串行口(McBSP)。McBSP 是由标准串口发展而来,支持全双工通信,拥有双缓冲寄存器,允许连续的数据流。此外,McBSP 具有独立的时钟输入和帧同步信号,使用者可以选择内部时钟或是外部时钟^②。由于 McBSP 的强大功能,设计者可以根据不同的需求将其配置为各种串口形式,使用非常灵活。本装置将 McBSP0 配置为 RS-232 供面板及打印机使用,另一串口 McBSP1 配置为 RS-485,与液晶及键盘模块通信。

1.5.2 以太网

以太网(Ethernet)是目前一种使用广泛的、采用总线拓扑的网络技术。装置配置有 100 Mbit/s 的以太网接口,当装置固定安装时,可以完成装置间以及装置与上位机之间的通信,方便上位机对电能质量进行整体监控。其硬件设计如图 4 所示。

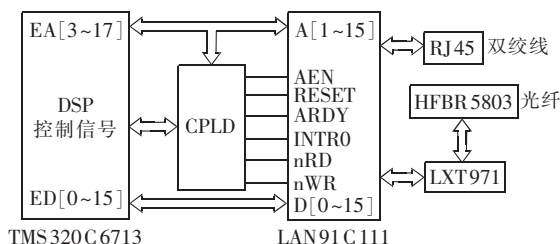


图 4 以太网端口图

Fig.4 The Ethernet port

以太网控制芯片用 SMSC 公司的 LAN91C111,它是 SMSC 公司为嵌入式系统应用设计的第 3 代快速以太网控制器。LAN91C111 支持 2 种不同的网

络接口。一种是利用内置的物理层模块 PHY 的收发口,另一种则是基 MII(介质无关)标准,可与外部收发器连接接口^③。为提高装置的通用性,本系统设计时将接口一作为双绞线端口,另一接口由收发器 LXT971 接光纤。

1.5.3 USB 2.0

系统对外通信还配置 1 个 USB 2.0 接口。系统选取 CYPRESS 公司的 CY7C68001 EZ-USB SX2 作为 USB 2.0 接口芯片。SX2 内置 1 个 USB 收发器,1 个串行接口引擎(SIE),以及 1 个收发数据用的命令解码器。支持 8 位或 16 位外部主机接口,能与 DSPs,ASICs,FPGAs 等绝大多数微处理器实现无缝连接,并且支持同步及异步 2 种接口方式^④。其 4 个可配置端点共享一个 4 KByte 的 FIFO 空间^[7]。SX2 接口设计如图 5 所示。

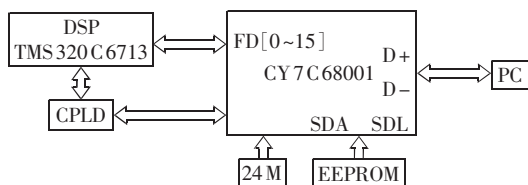


图 5 USB 端口图

Fig.5 The USB port

系统上电过程中,SX2 内部逻辑将会自动检测串行 I²C 口上是否有 EEPROM 存在,如果有,则自动从 EEPROM 加载,否则,控制器将从主机加载。本系统设定 CY7C68001 从 EEPROM 加载。SX2 有 3 个地址线,FIFOADR[0~2],可以通过这 3 根地址线选通 FIFO2,4,6,8 以及命令接口。实际系统中将 DSP 的低 3 位地址线 A[0~2]与 SX2 的 3 位地址线相连便可完成通道选择的控制^{[8]④}。

计算间谐波,就要相应增加分析窗的宽度^[9],如果在嵌入式系统上实现将会占用大量的存储空间和 CPU 执行时间。DSP 通过 SX2 对 PC 通信最快可以达到 480 Mbit/s^④,实时地将采样数据上传至 PC 机,利用 PC 机的强大功能和海量存储,可以轻松实现实时波形显示、记录。利用这些记录数据,使用者可以根据自己的需要编写算法实现间谐波的分析。

1.6 电源模块

本系统所需电压输入标准较多,如有源滤波需要 $\pm 5V$,运算放大以及射极跟随需要 $\pm 12V$,AD 需要 2.5V 的参考电压,DSP 需要 3.3V 的 IO 电压以及 1.2V 的核电压。综合考虑经济性及抗干扰性以及系统总功耗,最终决定采用如图 6 所示的电源方案。

① Texas Instruments,TMS 320 C 6713 TMS 320 C 6713 B float-point digital signal processors datasheet.

② Texas Instruments,TMS 320 C 6000 DSP multichannel buffered serial port(McBSP) reference guide.

③ SMSC,LAN91C111 10/100 non-PCI Ethernet single chip MAC+PHY Datasheet.

④ CYPRESS,CY 7 C 68001 EZ-USB SX2™ high-speed USB interface device.

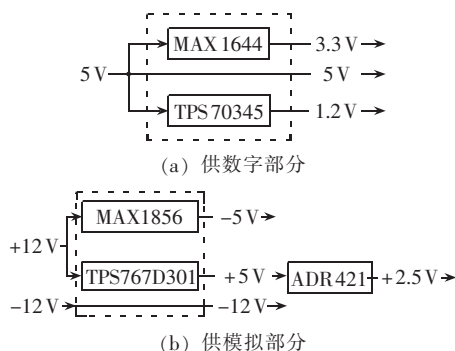


图 6 电源设计方案

Fig.6 The power supply design

遵循模拟电源与数字电源分离的原则,电源系统分为模拟与数字 2 大块。系统接入 +5 V 和 ± 12 V。+5 V 供数字部分,经变换,可得到数字的 5 V、3.3 V 和 1.2 V,供 DSP、SDRAM 和看门狗等数字芯片使用。 ± 12 V 供 AD 前的所有模拟部分使用,其中,可以通过 +12 V 分别转换得到数字滤波所需的模拟电源 ± 5 V,再由 +5 V 变换出 AD 所需的参考模拟电源 +2.5 V。这一设计,不但增强了装置的抗干扰能力,而且输入电压也比较简单,易于实现。

2 系统软件设计

一个系统是否能够高效运作,除了取决于硬件的性能外,软件设计也起着关键的作用。系统的软件设计包括 CPLD 逻辑设计、DSP 程序设计与 USB 程序设计 3 大部分。

2.1 CPLD 程序设计

本系统几乎所有的逻辑均在 CPLD 内完成,因此对 CPLD 的逻辑设计非常重要。本系统 CPLD 选用 XILINX 的 XC95144PQ160,它具有 160 个 IO 口。将 DSP 的高位地址线 EA[21~12]连接至 CPLD 的 IO 端口,并配置这些端口为输入,通过逻辑程序设计,可以在 CPLD 内模拟一个译码器逻辑,从而产生 AD、RTC、FLASH、SDRAM、USB 和以太网等所有与 DSP 并行通信模块的片选信号。

2.2 DSP 程序

DSP 的程序设计是本装置软件设计的核心部分,C6713 支持 3 种 BOOT 方式,即主机引导方式(host boot)、仿真引导方式(emulation boot)和 EMIF 引导方式(EMIF boot)^①。本系统选择第 3 种方式,从 ROM 引导加载。将引导程序烧入 FLASH(ROM),系统上电复位后,DSP 将会通过 EDMA 将 CE1 的 1 KByte 读入地址 0 处,并从地址 0 开始执行。由于用户应用程序一般大于 1 KByte,因此在引导程序中还应编写 2 级引导代码将 FLASH 中应用程序拷贝至 RAM^[10]。加载完成后,DSP 将根据用户程序对相关模块的寄存器进行初始化,具体流程如图 7 所示。

程序的运行分主程序流程和中断流程 2 部分。

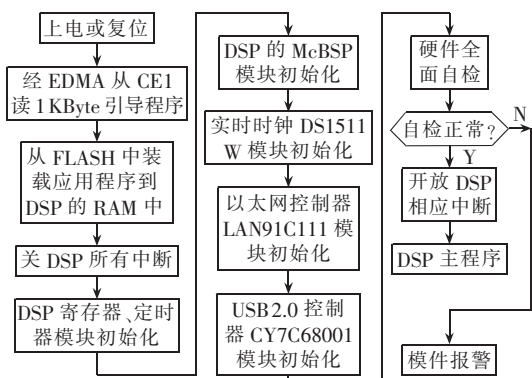


图 7 系统启动流程

Fig.7 The boot process of system

当没有中断时,系统运行主程序。一旦收到中断,则系统将首先保存当前处理现场,然后进入相应的中断流程。系统中断任务主要包括准同步测频、启动 AD 转换、GPS 校时等。为提高程序的可控性,本平台软件设计时尽量减少中断任务^[3]。

装置中 DSP 主程序设计主要完成以下功能:

a. C6713 有着强大的浮点运算能力,系统每周采样 128 点,并对 8 路信号分别进行 128 点 FFT,进而计算出 0~50 次谐波的幅值、相位等;

b. 对电能质量进行分析计算,如电压和电流有效值、峰值、相位角、频率、波峰因数、功率、功率 THD 等;

c. 利用计算值判断电能质量是否满足国家标准所要求的电能质量 5 项指标,即供电电压偏差、电压的波动和闪变、电网谐波、三相电压不平衡度、电力系统频率;

d. 记录电能质量的异常值,如瞬态尖峰、跌落、浪涌大小及时间等,并与 PC 机配合,完成故障时录波;

e. 通过 DSP 强大的 GPIO(通用 IO 口),完成很多控制功能,如多路开关的转换、设定值越限报警、继电器动作等;

f. 完成 DSP 与所有外围模块的通信。

2.3 USB 2.0 程序开发

USB 的程序设计包括 2 大部分。一是 C6713 与 SX2 之间的命令及数据的传输部分。C6713 通过命令口访问 SX2 的寄存器,完成 USB 的相关设置,进而编程实现 4 KByte FIFO 内数据的读写。另一部分则是上位机的驱动程序,其完全在 PC 机上实现,主要包括数据通信、电源管理、出错恢复等。

3 结语

本文给出了基于 TI 的新型浮点 DSP 处理器 TMS320C6713 的电能质量分析仪系统设计。同时根据实际应用的需要,对仪器的功能进行了很多实用性的拓展。以太网的使用,使得装置实现了网络化在线监测。本分析仪还配置有 USB 2.0 口,DSP 将数据实时传送给 PC 机,利用 PC 机强大硬件资源,可

① Texas Instruments, TMS320C6713 TMS320C6713 B float-point digital signal processors datasheet.

以对采集所得的数据进行故障录波、间谐波分析等更多更为复杂的分析。本装置较目前国内大部分产品在功能上更为完善,精度也较高。开发成本比购买国外同类产品低很多,有着很高的性价比。

本文介绍的电能质量分析仪的硬件系统已全部调试通过且运行稳定。经初步测试,C6713的运算速度和A/D的采样精度能够满足高精度测量分析的需要。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 邓少军, 张振川. 电能质量监测设备的发展[J]. 电测与仪表,2005,42(5):7-9.
DENG Shao-jun,ZHANG Zhen-chuan. Development of power quality monitoring device[J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**,2005,42(5):7-9.
- [3] 唐建辉. 基于DSP和网络通信技术的数字继电保护平台研制[D]. 南京:东南大学,2002.
TANG Jian-hui. Research on platform of digital relay protection based on DSP & communication technology of network[D]. Nanjing:Southeast University,2002.
- [4] 高翠云, 江朝晖. 利用MAX291实现抗混叠滤波[J]. 现代电子技术,2004(10):1-5.
GAO Cui-yun,JIANG Zhao-hui. Realization anti-fold filter use for MAX291[J]. **Modern Electronics Technique**,2004(10):1-5.
- [5] 江思敏,刘畅. TMS320C6000 DSP应用开发教程[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [6] 李方慧,王飞,何佩琨. TMS320C6000系列DSPs的原理与应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2003.
- [7] 扈啸,张圻,张连超. USB2.0控制器CY7C68013特点与应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2002(10):48-54.
HU Xiao,ZHANG Qi,ZHANG Lian-chao. Features and use of USB2.0 controller CY7C68013[J]. **Microcontroller & Embedded System**,2002(10):48-54.
- [8] 库依楠,杨玉森,韩洋. 基于DSP的USB2.0设备接口协议

- 的实现[J]. 吉林大学学报:工学版,2005,35(2):170-173.
KU Yi-nan,YANG Yu-sen,HAN Yang. Device interface protocol implementation based on USB 2.0[J]. **Journal of Jilin University:Science Edition**,2005,35(2):170-173.
- [9] 祁才君,王小明. 基于插值FFT算法的间谐波参数估计[J]. 电工技术学报,2003,18(1):92-95.
QI Cai-jun,WANG Xiao-hai. Interharmonics estimation based on interpolation FFT algorithm[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**,2003,18(1):92-95.
 - [10] 李鹏,郑喜凤,丁铁夫. TMS320C6000系列DSPs外接FLASH引导方式的实现[J]. 长春理工大学学报,2004,27(4):52-54.
LI Peng,ZHENG Xi-feng,DING Tie-fu. The method for flash bootloading on TMS320C6000 platform[J]. **Journal of Changchun University of Science and Technology**,2004,27(4):52-54.
 - [11] 邹祖冰,蔡丽娟,甘辉霞. 便携式钳形电流谐波分析仪的研制[J]. 电力自动化设备,2004,24(5):72-74.
ZOU Zu-bing,CAI Li-juan,GAN Hui-xia. Research on portable clamp current harmonic analyzer[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2004,24(5):72-74.
 - [12] 莫昕,童陆园. 电能质量在线分析仪的研制[J]. 电力自动化设备,2003,23(1):58-60.
MO Xin,TONG Lu-yuan. Development of online power quality analyzer[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(1):58-60.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

熊 静(1979-),男,江苏靖江人,硕士研究生,从事新型电能质量分析仪开发研究(E-mail:xiong_jing98@hotmail.com);

吴在军(1975-),男,江苏南京人,讲师,博士,主要从事变电站自动化、实时系统等方面研究工作(E-mail:wuzaijun@yahoo.com.cn);

胡敏强(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,主要从事工程电磁场计算、电机及其控制技术、电气主设备状态监测与故障诊断等方面的研究工作。

Design of multi-function power quality analyzer based on DSP TMS320C6713

XIONG Jing,WU Zai-jun,HU Min-qiang

(Department of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: According to the practical requirements of electric power quality analysis,the overall hardware implementation scheme and software design idea of an electric power quality analysis equipment are proposed,which are based on the float digital signal processor TMS320C6713. The functions and characteristics of DSP,as well as the concept of development,are introduced. Active filter filters 50th and above harmonics to reduce their influences;16-bit AD guarantees high precision; and the Ethernet ports facilitate the integrated supervision and test of different areas. The design scheme of power supply which separates digital power supply from analog power supply is also introduced. The function extension is discussed,such as the real-time waveform display,fault wave recording,inter-harmonics analysis and so on with USB2.0 port and PC.

Key words: electric power quality; DSP; Ethernet; USB2.0