

基于 DSP 的同步交流采样技术

周志宇¹, 李裕能¹, 郭松梅², 张 霖¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 湖北工业大学 机电系, 湖北 武汉 430079)

摘要: 简要介绍了电网信号交流采样的分类, 重点分析了采用软件实现同步交流采样的工作原理和误差来源, 并结合 DSP 技术给出一种基于 TMS320F24X 芯片的软件同步采样处理系统的实现方案, 给出了软件设计流程。同时讨论了减少误差及在电网有畸变情况下保持同步的方法。在测量电网信号的有效值、功率、高次谐波以及故障录波等方面使用该技术, 可保证检测精度时同时减少硬件的复杂度。

关键词: 同步采样; 电网信号; DSP

中图分类号: TM 76; TP 274

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)05-0057-04

用微机进行交流周期电气信号采样的过程中, 特别是在对电网信号的有效值、功率的测量, 高次谐波的分析, 故障录波领域, 同步技术是影响采样质量的重要因素。目前的采样值测量、分析周期信号的理论大多建立在同步采样的基础上, 然而在工程上要做到完全的整周期采样很困难, 只能尽量减少同步误差。本文在介绍交流采样分类和误差来源的基础上, 结合 TMS320F24X 系列 DSP 的 CPU 与外设, 介绍一种软件同步采样处理系统的设计。

1 交流采样分类及同步误差

交流电气信号采样可分为直流采样和交流采样 2 种方式。直流采样是采集经过变送器整流后的直流量, 软件设计简单、计算简便, 对采样值只需作一次比例变换即可得到被测量的数值, 采样速率要求不高、易于实现。然而, 直流采样一般只能反映被测量的单一信息(如有效值), 时间常数大, 不能及时反映被测量的突变, 在电网波形有较大畸变时, 其误差大、成本较高。

交流采样是对被测信号的瞬时值进行采样, 然后对采样值进行分析计算获取被测量的信息。交流采样的采样速率要求高, 程序计算量相对较大, 但是它的采样值中所含信息量大, 可通过不同的算法获取所需的多种信息(如有效值、相位、谐波分量等), 其实时性好, 且随着 DSP 技术的发展, 高速实时数据处理成为可能, 使交流采样成为目前主要的使用方式^[1-2]。

对周期为 T 的被测电气信号在 $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_N$ ($i=0, 1, \dots, N$; 下同) 时刻进行交流采样, 不失一般性, 令 $t_0=0$, 如果有

$$\Delta t = t_N - T = 0 \quad (1)$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i = T_s \quad (2)$$

式(1)(2)成立, 则称采样为理想同步采样^[3-4], 其中 T_s 为采样周期。可见, 理想同步须满足 2 个条件:

- 信号周期和采样周期存在整数倍的关系;
- 采样点间的时间间隔应严格保持一致。

这时, 第 i 采样点的采样时刻为

$$t_i = iT / N \quad (3)$$

但同步总是相对的, 绝对同步只是理想情况。在实际同步采样中, 要严格满足式(3)很困难。为便于讨论, 定义第 i 个采样点同步误差为 $\Delta t'_i = t'_i - iT / N$, 表示第 i 个采样点的实际采样时刻 t'_i 与其理想同步采样时刻 t_i 之间的偏差。

对于检测精度要求高的场合, 一般, 交流采样技术有硬件同步采样和软件同步采样 2 种方式。硬件同步采样用得相对较少, 其用专门的硬件电路产生同步于被测信号的采样信号, 精度高, 但硬件复杂、成本较高, 例如目前用得较多的锁相环同步电路。软件同步由定时器中断实现, 它首先测量电网周期 T , 然后根据周期 T 和每周期内的采样点数 N 确定定时器的定时值 T/N 。软件同步不需要专用的同步电路, 与硬件同步相比其硬件结构简单, 只需在微机采样装置中设置电网频率跟踪测量环节。

下面介绍一种基于 DSP 芯片 TMS320F240 开发的交流采样系统, 该系统巧妙地利用该款 DSP 的定时器、捕获器和不可屏蔽中断 NMI (Non-Maskable Interrupt) 实现了跟踪频率变化的交流采样, 并结合误差分析, 给出减少误差的方法^[5]。

2 NMI 中断、定时器、捕获器功能^[6-7]①②

2.1 NMI 中断

TMS320F24X 系列有一个 NMI 引脚。当该引脚

① TMS320C24X User's Guide Texas Instrument, 1999.

② TMS320F/C24X DSP Controllers Peripheral Library and Specific Device, 1999.

有跳变信号时(可编程为上升沿或下降沿触发),立即进入中断程序,可以用于紧急事件的处理。本文中用于跟踪被测电量的频率。

2.2 定时器

TMS320F 240 有 3 个通用定时器,每个通用定时器有以下 6 种计数方式。

- a. 模式 0: 停止/保持模式。
- b. 模式 1: 单增计数模式。
- c. 模式 2: 连续增计数模式。
- d. 模式 3: 定向增/减计数模式。
- e. 模式 4: 单增/减计数模式。
- f. 模式 5: 连续增/减计数模式。

2.3 捕获器

捕获单元用于捕获引脚上电平的变化并记录发生的时间,记录事件发生的时间以定时器的计数器作时基。当捕获引脚发生跳变时,捕获单元将该时刻时基的计数寄存器 T_3 CNT 的值装入相应的 FIFO 队列中。FIFO 队列可以装入 2 个值,第 3 个装入时会把第 1 个值挤出。如果将捕获器的跳变输入信号和 NMI 输入信号并联,则可以在 NMI 中断程序中读取跳变时的时基值(读 FIFOx 寄存器)。例如:以 T_3 作时基,引脚电平第 1 次上跳时, T_3 计数寄存器 T_3 CNT 的值为 X_1 ,第 2 次为 X_2 , T_3 分频系数为 D ,CPU 频率为 f_c ,则变化时间间隔 $t = D / f_c \times (X_2 - X_1)$ 。

3 设计过程分析

软件同步采样通过在定时中断服务程序中采样,并对定时器重置定时值实现,定时值根据电网周期 T 和每周采样次数 N 确定。一般条件下,同步条件式(1)较难实现,必须采用一定的解决方法。下面介绍采用频率跟踪技术减少软件同步周期误差的方法。

采样时的周期值总是根据在此之前测定的电网周期确定的,电网周期是一个变化量,但在一个较短的时间内(如近几个周期),可以将其看作一个常量,即可将其看作一个短时平稳信号。

过零触发电路的输出接 TMS 320F 240 外部不可屏蔽中断引脚 NMI,确保了中断的实时响应;同时,过零触发电路的输出还接到捕获器 1 的输入端 CAP1 (如图 1 所示), T_3 定时器作捕获器的时基,捕获器可以捕获 2 个脉冲间隔的时间(用 T_3 计数器的变化量表示),这样可以计算出周期/频率。用 T_2 定时器完成触发采样,每隔一个采样周期 T_2 定时器的比较匹配输出端 T_{2CMP} 输出一个下降沿脉冲,去启动 ADC 进行一次 A/D 转换。

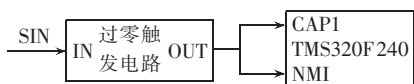


图 1 触发电路

Fig.1 Triggered circuit

设 n 为脉冲个数,则定时时间 $t_d = n / (f_c \cdot D^{-1})$, n 与定时周期寄存器的值或比较寄存器的值有关。工作过程如下:

- a. 根据 f_c, t_d 确定计数寄存器的初值 T_{XNT} 、周期寄存器的初值 T_{XPER} 、比较寄存器的初值 T_{XCMP} ;
- b. 启动定时器计数;
- c. 计数到比较寄存器的值发生比较匹配中断,同时使 T_{XCMP} 引脚发生跳变,本文中利用 T_{2CMP} 的跳变去启动一次 A/D 转换;
- d. 计数到周期寄存器的值发生周期匹配中断。

由于 CAP1 端和 NMI 端连在一起,每当 CAP1 端出现一个上升沿脉冲表示一个周期的开始,同时 NMI 中断服务程序启动,在中断程序中读取 FIFO1 寄存器中的值赋给 T_3 的周期寄存器和比较寄存器。需要指出的是:定时器的计数周期 T_r (最小分辨率)不可能无限小,而采样周期 T_s 必须用 T_r 量化,即以 T_r 的整数倍表示,从而使计算机的实际采样周期 T_s 与理想计算值 T/N 之间会出现误差,使同步条件式(1)得不到满足,可采取措施动态解决^[8]。

设 $h = \text{int}(T_s / T_r)$, $k = T_s / T_r - \text{int}(T_s / T_r)$,其中 int 表示取整; T_s / T_r 对应于定时器的计数值,一般不为整数。显然, T_s / T_r 介于 h 和 $h+1$ 之间,用此值作为定时器计数值,所得实际采样周期与理想采样周期都存在误差,这一误差累积产生周期误差。 T_s / T_r 取值 h 时,周期误差为 NkT_r ;取值为 $h+1$ 时,误差为 $N(1-k)T_r$ 。

为减少周期误差,可利用 TMS 320F 240 的片内资源,实现动态跟踪频率变化的交流采样。设 FIFO1 的初值总为 0,则 FIFO1 的值是刚过去周期内 T_3 计数器增加值, T_3 的分频系数设为 128,DSP 的工作频率为 20 MHz,捕获器用 T_2 作时基,CAP1 端每出现一个上升沿表示一个周期的开始,并进入中断服务程序。上一周期的计算为

$$T = (1/20) \times 128 \times \text{FIFO}_1$$

设 T_3 工作在定时/计数状态下,给 T_3 的周期寄存器 T_{3PER} 赋初值 FIFO1 的值,则 T_3 的周期中断时间即为上一周期测得的电网周期时间。这时在 NMI 中断程序中将 FIFO1 的值赋给 T_2 的周期寄存器 T_{2PER} 和比较寄存器 T_{2CMP} ,即解决了定时器分辨率问题。因为设置 T_2 的分频系数为 1,即 T_2 周期寄存器 T_{2PER} 中保存的是 FIFO1 值,是一个整数,即采样周期为一个电网周期的 $1/128$,当 T_2 的计数器与 T_2 的比较寄存器发生匹配时, T_{2CMP} 引脚发生跳变,启动一次 A/D 采样,而此时 T_2 通用定时器的计数器又可复位为 0,从 0 开始计数,而 T_2 的周期寄存器和比较匹配寄存器又可根据上一周期的 FIFO1 值写入,从而实现了一个电网周期的 128 点采样,达到了对频率的动态跟

踪效果。只是在时间上有一个周期的滞后。

需要指出的是:中断响应时间也是引起同步误差的重要原因,可以在 CPU 中断处理程序中重置定时器值时,先估算出中断响应时间,然后在定时器中减去中断响应时间,即在 T_2 的周期寄存器和比较寄存器中减去中断响应时间折算到寄存器值的数值。

4 软件设计

直流采样是对整流后的直流量采样,其软件设计、计算非常简单,而交流采样是对被测信号的瞬时值采样,再对采样结果进行大量的数值处理,它是用软件功能代替直流采样中的硬件功能,因而软件设计要复杂得多^[9-10]。下面给出交流电压 U 、电流 I 、有功功率 P 、无功功率 Q 、功率因数 λ 等电参量的离散公式。

电压有效值即 1 个周期内的均方根值定义为^[11]

$$U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 dt}$$

其离散化值为

$$U=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N u_n^2}$$

同理可得:

$$I=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N i_n^2}, P=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N u_n i_n, Q=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N u_n i_{(n+N/4)}$$

$$\lambda=\cos\varphi=\frac{P}{UI} \text{ 或 } \lambda=\cos\varphi=\frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}$$

式中 $i_{(n+N/4)}$ 为滞后 u_n 90° 的电流值。

电量测量软件设计流程图如图 2 所示。

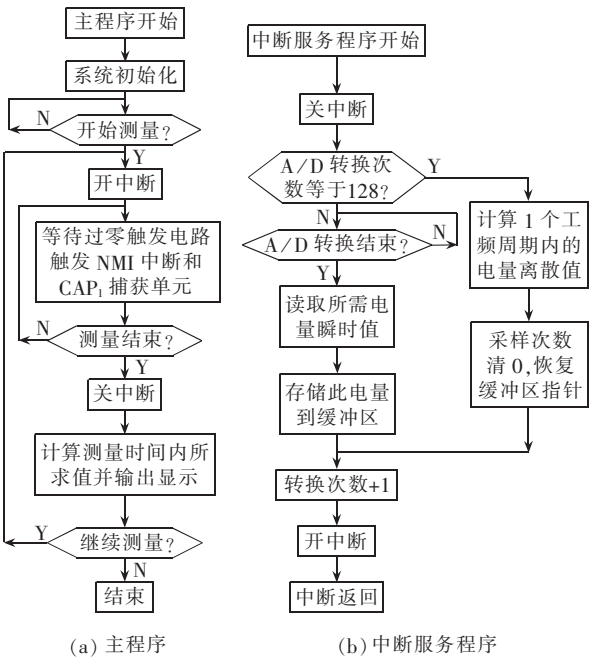


图 2 软件流程图

Fig.2 The program flowchart

在本程序中,每周周期采样点为 128 点,结合一定的 DSP 滤波算法,可得到高精度的计算结果^[12]。

5 结语

本文简要介绍了交流同步采样的分类和同步误差,重点分析了采用软件同步采样并分析了误差来源,即主要是周期误差,介绍了利用 TMS 320 F 240 DSP 的在片资源,在减少周期误差时实现了对交流采样周期的动态跟踪,在测量电网信号的有效值、功率、高次谐波、故障录波等方面使用该技术,可以保证检测精度,又同时减少硬件的复杂度,具有一定的实际意义。

参考文献:

[1] 谢小荣,韩英铎. 电力系统频率测量综述[J]. 电力系统自动化,1999,23(3):54-58.
XIE Xiao-rong,HAN Ying-duo. An overview on power system frequency measurement[J]. **Automation of Electric Power Systems**,1999,23(3):54-58.

[2] 盛新富,戚庆成. 常用电工参数数字化测量中的非同步采样误差[J]. 电工电能新技术,1998,4(1):10-14.
SHENG Xin-fu,QI Qing-cheng. Non-synchronous sampling error in the digital measurement of common electrical parameter[J]. **Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy**,1998,4(1):10-14.

[3] 胡虔生,马宏忠. 非正弦周期信号测量同步误差研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):35-40.
HU Qian-sheng,MA Hong-zhong. Research on the synchronous error in measurement of non-sinusoidal periodic signals[J]. **Proceedings of the CSEE**,2000,20(9):35-40.

[4] 马宏忠,胡虔生. 软件同步采样的误差分析[J]. 电工技术学报,1996,11(1):43-47.
MA Hong-zhong,HU Qian-sheng. Analysis on errors synchronous sampling by software[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**,1996,11(1):43-47.

[5] 张雄伟. DSP 控制器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[6] Texas Instruments Incorporated. TMS 320LF/LC 24 系列 DSP 指令和编程工具[M]. 徐科军,肖本贤,张兴,等,译. 北京:清华大学出版社,2005.

[7] Texas Instruments Incorporated. TMS 320LF/LC 24 系列 DSP 的 CPU 与外设[M]. 徐科军,肖本贤,张兴,等,译. 北京:清华大学出版社,2005.

[8] 黄纯,何怡刚,江亚群,等. 交流采样同步方法的分析与改进[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):38-42.
HUANG Chun,HE Yi-gang,JIANG Ya-qun,et al. Analysis and improvement of synchronization technique for AC sampling[J]. **Proceedings of the CSEE**,2002,22(9):38-42.

[9] 毛晓波,赵文丽,黄俊杰. 交流采样系统及其 DSP 实现方法[J]. 微计算机信息,2005,21(2):54-55.
MAO Xiao-bo,ZHAO Wen-li,HUANG Jun-jie. AC samp-

ling technology result of realizing using DSP[J]. **Control & Automation**,2005,21(2):54-55.

[10] 曹孝宁,吴华仁,龙可微,等. 锁相环同步采样技术在电网数据采集中的应用[J]. 电力自动化设备,1996,16(4):58-60.

CAO Xiao-ning,WU Hua-ren,LONG Ke-wei,et al. Application of the PLL synchronous sampling technique for data acquisition in power network[J]. **Electric Power Automation Equipment**,1996,16(4):58-60.

[11] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社,1998.

[12] 肖宛昂,曹为民. TMS320F240 中断系统分析及 C 语言编程[J]. 单片机与嵌入系统应用,2003,12(6):460-463.

XIAO Wan-ang,CAO Wei-min. Analysis of TMS320

F 240 interrupt system and C programme[J]. **Microcontrollers & Embedded Systems**,2003,12(6):460-463.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

周志宇(1975-),男,湖北崇阳人,硕士研究生,主要从事电力系统电能质量监测与控制的研究(E-mail:zhiyuzhou@163.com);

李裕能(1948-),男,湖北武汉人,教授,主要从事电力系统监测与控制技术的研究;

郭松梅(1977-),女,湖北英山人,助教,主要从事数字电路的教学和研究工作;

张 霖(1976-),男,江西新余人,硕士研究生,主要从事高电压在线绝缘监测和电能质量在线监测的研究。

Synchronous AC sampling technologies based on DSP

ZHOU Zhi-yu,LI Yu-neng,GUO Song-mei,ZHANG Lin

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;

2. Faculty of Mechanic & Electrical,Hubei University of Technology,Wuhan 430079,China)

Abstract: The classification of synchronous AC sampling technologies for power network signals is briefly introduced,and the emphasis is put on the analysis of the principle and error sources of SW synchronous sampling. The implementation of a SW synchronous sampling and data processing system based on DSP TMS320F 24X is presented,and the corresponding software design is put forward. The way to reduce error and to keep synchronous during power wave distortion is also discussed. Applying this technology in measuring the power network signals of virtual value,power and harmonics and logging fault waves can lower the complexity of hardware while the measuring accuracy ensured.

Key words: synchronous sampling; power network signal; DSP

