

使用 MCU 内置序列发生器控制的交流信号采样

曹融¹, 张敏¹, 杜峰², 张韬¹

(1. 西安工程大学 机电工程学院, 西安 710048;

2. 国网陕西省电力公司 西安供电公司, 西安 710032)

摘要: 针对一款隔离开关控制器交流信号采样的需求, 在分析使用 MCU 内置的采样序列控制器实现多通道交流信号同时采样可行性的基础上, 提出了完整的软同步交流信号采样技术的解决方案, 设计了交流信号输入调理电路和相应的信号采集软件, 使用 LM3S9D92 内置的 ADC 系统实现了三相四线交流线路 PQIU 电气参数的采样, 有效提升了控制器产品的性价比; 测试结果表明, 所设计的交流信号采样部分的精度满足技术规范书的要求。

关键词: 交流信号采样; 采样序列发生器; 信号调理; 模数转换器

AC Signal Sampling Methods Controlled by Sample Sequencer in MCU

Cao Rong¹, Zhang Min¹, Du Feng², Zhang Tao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Xi'an Electric Power Supply Co., Xi'an 710032, China)

Abstract: Aiming at the requirement of AC signal sampling for a disconnect switch controller, a complete solution of software synchronous AC signal sampling was proposed, and the conditioning circuit and the signal acquisition software module of AC signal were designed on the basis of analyzing the feasibility of using sample sequencer to realize simultaneous sampling of AC signals. The sampling task of PQIU electrical parameters of three-phase four-wire AC lines was realized by the built-in ADC system of LM3S9D92, and the performance-price ratio of controller products is improved effectively. The test results show that the precision of AC signal sampling part meets the requirement of technical specification.

Keywords: AC analog input; sample sequencer; signal conditioning; analog-to-digital convertor

0 引言

随着智能电网技术的快速发展, 变电站一次设备智能化项目的研究也在不断深入^[1-2]。变电站一次设备智能化的核心在于相应智能组件的设计开发^[3-4], 但是智能组件存在运行环境恶劣、电磁干扰严重等诸多不利因素, 导致变电站一次设备智能化相对变电站智能化的其它项目处于滞后状态^[5]。隔离开关控制器是一种具有数据采集, 开关分合控制, 信息互通和安全检测等功能的智能组件, 若需要对控制开关动作的三相四线交流电机进行控制, 进而需要对其交流信号进行 PQIU 全量采样, 以便实现电机故障保护和故障录波分析^[6]。这里主要就该控制器交流信号采样的

实现技术进行介绍。交流信号采样是一种成熟的技术, 其关键在于^[7]: ①同相 U、I 需要同时采样, 保证 P、Q 计算的精度; ②按电网周波同步采样, 确保 PQIU 的积分计算区间与电网周波一致。为了达到上述目的, 一般都采用多个 ADC 或多通道同时 AD 采样系统, 以及同步采样方法来实现交流信号采样^[8-9]。所设计的控制器采用了 Stellaris® LM3S9D92 处理器作为 CPU^[10], 该处理器内部集成了两路 12 位 ADC 转换器, 使用采样序列发生器控制 ADC 采样, 性能十分优越。由于 ADC 模数转换器的成本较高, 如果能使用该处理器内置的 ADC 实现控制器所需的交流信号采样, 则可以大幅降低产品成本。这里就项目的设计与实现技术进行简单介绍。

1 采用 MCU 内置的 ADC 进行交流信号采样

1.1 LM3S9D92 内置的 ADC 系统

Stellaris® LM3S9D92 处理器是一款 Cortex M3 嵌入式 ARM MCU, 内置有 512k 程序存储器和 96k 数据存储器, 以及丰富的外设控制器, 其中包括 2 路 ADC 模数转换器^[10]。该 ADC 的主要特性包括: ①具有 12 位转换分辨率; ②支持 16 个输入通道; ③采样率可达 1M 次; ④4 个

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-11-05。

基金项目: 西安市 2018 科技创新引导项目(201805030YD8C G14(10))。

作者简介: 曹融(1994-), 女, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事机电工程专业应用项目实施技术方向的研究。

通讯作者: 张敏(1962-), 男, 陕西西安人, 副教授, 主要从事机电一体化、嵌入式系统应用等领域产品设计与实现技术方向的研究。

可编程序列发生器 (sample sequencer, SS), 每个 SS 有 8 个单元的 FIFO, 用于存放 AD 转换结果; ⑤ 2 路 ADC 可以独立工作, 并通过移项器进行同时性控制; ⑥ 支持多种转换触发控制: 定时触发器, 模拟比较触发器处理触发器等; ⑦ 16 个输入通道可以自由编程, 分配给两个 AD 转换器进行分别采样等, 内置的 2 路 ADC 模块的连接关系如图 1 所示。

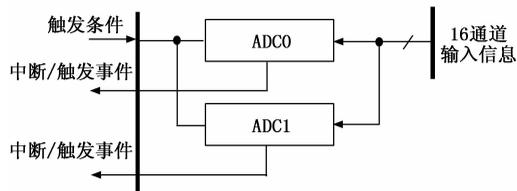


图 1 内置 2 路 ADC 模块的连接关系

1.2 采用 LM3S9D92 内置的 ADC 进行多通道信号同时同步采样

1.2.1 同相 U 和 I 信号的同时采样

根据有功和无功功率的定义, 在计算功率参数时要使用 U 和 I 两条曲线同一时刻的采样值进行乘法运算, 否则计算结果没有物理意义或者存在理论误差。为此, 通过交流采样技术测量线路功率时, 就需要实现同相 U、I 信号的同时采样^[11]。LM3S9D92 内部正好集成了 2 路 ADC, 可以实现 U_a/I_a 、 U_b/I_b 、 U_c/I_c 信号的同时采样, 但是, 需要设置这 2 路 ADC 同时采样的相位控制。这 2 路 ADC 可以灵活选择触发源和信号输入源, 设置 2 者之间采样的相位差。其中触发信号选用内部定时器同时触发; 采用各自的复用选择寄存器 (ADCEMUX) 分别顺序选择 $U_a \sim c$ 、 $I_a \sim c$, 以便控制同相信号的同时采样; 通过采样相位控制寄存器 (ADCSPC) 设置 2 路 ADC 对不同输入信号同相采样, 方法如下:

- 1) ADC0 模块: ADCSPC = 0x00, 对 AN0 采样;
- 2) ADC1 模块: ADCSPC = 0x00, 对 AN1 采样。

这样, 内置的 ADC 系统就实现了同相信号的同时采样的目的。此外, 采样序列发生器 SS 支持连续 8 个信号一次性采样, 采样结果缓存到其内部的 FIFO 之中, 使用 2 个 SS 分别控制 2 路 ADC, 一次触发可以一次完成 16 个信号的采样。根据项目的实际需要, 除 6 路交流信号之外, 还有其他 4 路模拟量需要采集, 因此实际采样实现时, 2 个 SS 各实现 5 个模拟信号采样, 即可满足应用需要。由于内置的 ADC 系统每路模拟量输入都有独立的采样保持器, 加上 ADC 系统的采样频率为 1M, 时间延迟只有 $500 \mu\text{s}$, 使得该内置的 ADC 具有六通道同时采样 AD 转换器 ADS8365 的特性^[8,12]。

1.2.2 与电网周波软同步的方法

由于电网周波的波动性, 电气交流信号采样需采用周波跟随技术实现信号的同步采样^[2,13], 这里采用软同

步交流采样方法进行信号采样。软同步交流采样的关键在于周波信号测量的准确性^[14-15]。为了实现周波信号测量, 一般将电压信号整形成方波, 再用 MCU 的计数器中断进行测量。但是具体实现时发现周波信号测量不准, 导致采样数据的误差过大, 需要进一步分析和改进。就其原因, 在飞读定时计数寄存器时, 偶尔出错; 其次, MCU 在指令边界响应中断时具有一定的时间不确定性; 关键在于控制器软件平台使用了 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时操作系统, 该系统进出临界区宏采用关、开 MCU 总中断实现, 而临界区保护在 OS 内部和应用软件中都频繁使用, 大大加大了中断响应时刻的不确定性, 因此这种周波信号周期的测量方法不可取。

通过对处理器中的通用定时器进行分析, LM3S9D92 内置的通用定时器 GPTM 支持 16 位输入边沿定时模式, 该模式的工作过程是: 设定装载值和捕获边沿类型。计数器被使能后开始自由运行, 从装定值开始递减计数, 计数至 0 时重装初值并继续计数; 若从 CCP 管脚上出现有效的输入脉冲边沿事件, 则当前计数值会被自动复制到一个捕获寄存器里, 直到遇到下一个有效输入边沿时才被刷新, 否则保持不变。利用这一特点, 可以采用冻结计数器值的方法来测量信号的周期。具体实现方法为: 在接入 GPTM 捕获比较 PWM 管脚的 CCP 信号触发时, GPTMTnR 寄存器捕获 T_n 计数器的当前值, 并且该计数器的值可以通过控制器来读取。这样, 中断响应时, GPTMTnR 寄存器的内容因被冻结锁存, 不会因中断响应时机不确定而造成误差, 可以准确计算得到当前电网的周波。为了配合交流信号同步采样, 每周波信号采样一旦完成, 立即利用先前测量得到的周波信息调整分频触发参数, 使得采样间隔紧随电网频率的变化。为了避免外部触发信号不发生时 (如: 没有接入交流信号和交流信号不带电), CPU 因检测不到信号周期而停止采样的问题, 系统对该中断进行自动监视, 一旦检测到该问题, 即以 50 Hz 频率自动采样, 并指示周期采样的方式, 以方便控制器的调试与检测。

综上所述, 采用 LM3S9D92 内置的 ADC, 再使用通用定时器配合, 可以实现电气交流信号的软同步采样。

2 交流信号采样通道

2.1 交流信号调理

外部的交流输入为 220 V/5 A 的强电信号, 为了接入 CPU, 必须先使用微型精密互感器 TV 和 TA 对其进行变换, 交流信号采样部分的总体框架如图 2 所示。

如图 2 所示的框架图, 电压互感器 TV 焊装在电路板上, 在其前级采用压敏电阻、磁珠、Y 电容进行抗干扰处理, 电流互感器 TA 采用穿心接入, 在其后级采用磁珠吸收高频信号, 互感器输出经滤波后接入压随电路。另外, 接入 CPU 管脚前还将经过电压跟随器和 $0 \sim 3 \text{ V}$ 钳位电路, 在保证信号准确的前提下, 在外部信号异常时也不会损坏

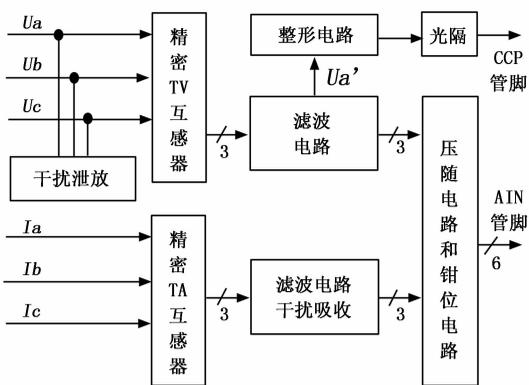


图 2 控制器交流信号接入框架图

MCU 处理器。以 U_a 和 I_a 信号接入为例, 交流电压和电流信号调理电路如图 3 所示。

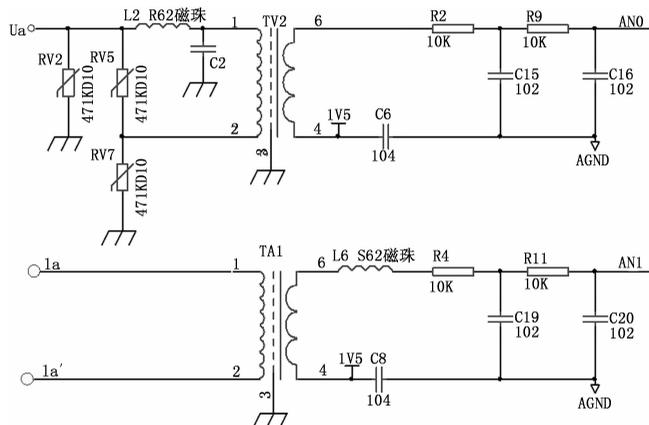


图 3 交流电压和电流信号调理电路

2.2 周波信号调理

为了检测电网的周波, 从 U_a 信号调理的输出端引入进行处理。首先采用二极管进行钳位, 防止外部信号异常损坏调理电路。再使用 LF358 双运算放大器进行放大处理, 使之接近方波, 最后采用斯密特触发反向门进行整形, 经过光电隔离后, 接入 MCU 的 CCP 管脚, 实现频率信号的下降沿触发。周波信号调理电路主要部分的原理如图 4 所示。

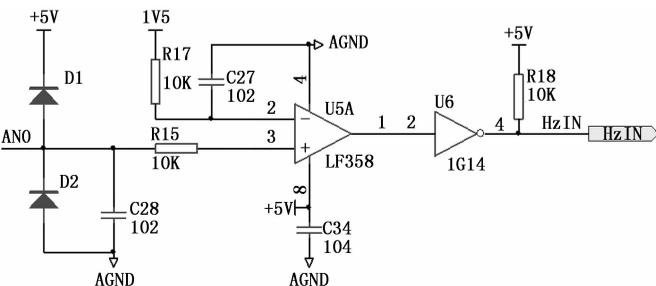


图 4 电网周波信号调理电路

3 软件设计

在确定使用 LM3S9D92 内置 ADC 系统实现软同步电气交流信号采样的技术方案之后, 完成了信号调理电路设计, 并生产安装了该控制器的硬件平台。LM3S9D92 内置有 4 个 GPTM, 控制器硬件使用其中 Timer1 进行周波信号测量和 ADC 触发, 下面介绍相应的软件模块的设计方法。软件设计主要包括四部分: 初始化、GPTM1 A 通道中断服务程序、ADC0 和 ADC1 的中断服务程序、交流信号有效值和相位角计算等。

3.1 初始化

初始化部分包括 GPTM 和 ADC 初始化两部分, 其中 GPTM 的 A 通道用于周波信号测量, B 通道触发 ADC0 和 ADC1 采样。控制器采用 16 MHz 的基础频率, 倍频后 MCU 工作在 80 MHz, Timer1 A 通道预分频 80 次, 定时单位设置为 $0.5 \mu s$ 进行周波信号测量。GPTM1 初始化过程的自然语言描述如下:

- 1) 设置 CCP1 管脚的交叉定义;
- 2) 设置 GPTM1AMR 寄存器, 使 A 通道工作在边沿输入定时模式;
- 3) 设置预分频初始值;
- 4) 使能触发中断;
- 5) 设置 B 通道的工作模式是触发 ADC;
- 6) 设置 B 通道的分频次数为 50 Hz 24 次采样的参数。

ADC 的初始化过程为:

- 1) 选择 ADC0 模拟输入通道, 选择 ADC1 的模拟输入通道;
- 2) 设置 SS0 控制 ADC0 采样, SS1 控制 ADC1 采样;
- 3) 设置 ADC0 和 ADC1 同相位采样;
- 4) 设置 ADC0 和 ADC1 由 CPTM1 的 B 通道触发;
- 5) 启动 ADC0 和 ADC1 的中断。

3.2 周波测量中断服务程序

周波信号测量中断服务程序的主要任务是: 读取 GPTMTAR 寄存器中的值, 计算当前电网的周波, 并保存在全局变量 CurrentHz 中, 供 ADCnISR 和其它任务使用。

3.3 ADC0 和 ADC1 中断服务程序

ADC0 和 ADC1 的中断服务程序工作任务相同, 每周波 24 次采样, ADC 中断服务程序流程框如图 5 所示。

3.4 交流采样中断处理任务

控制器软件的支撑平台为 $\mu C/OS-II$ 实时多任务操作系统, 交流信号采样软件基于中断服务程序 ISR+中断服务任务 IST 的架构设计, ISR 完成一个周波信号采样之后向 IST 发送信号, IST 一旦收到发送的信号量, 将会被唤醒, 并进行采样数据处理。

交流信号数据处理使用离散傅里叶算法实现, 使用离散傅里叶算法可以计算得出基波分量的有效值。

装置采集的三相交流信号的离散公式如式 (1):

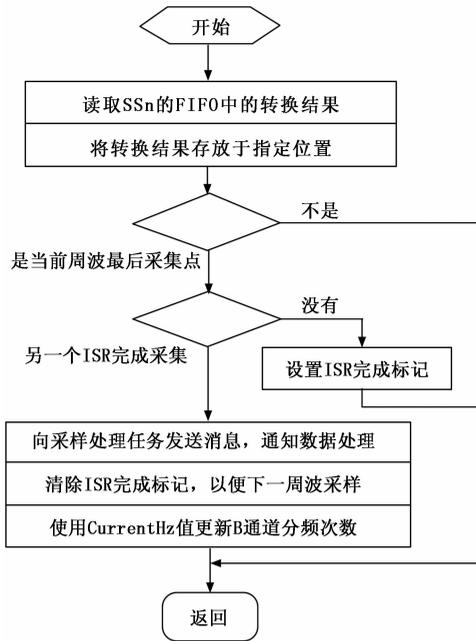


图 5 ADC 中断服务程序流程框图

$$V(k) = \sqrt{2} \sin(\frac{2\pi}{N}k + \Phi) \quad (1)$$

m 次谐波的复数形式 $X_c + jX_s$ 的实部和虚部分别如式 (1) 和 (2):

$$X_c = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v(k) \cos(\frac{m2\pi}{N} \cdot k) \quad (2)$$

$$X_s = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v(k) \sin(\frac{m2\pi}{N} \cdot k) \quad (3)$$

式 (1) 和式 (2) 中, 取 $m=1$, 可得一次谐波 (基波) 的 X_c 和 X_s 如式 (2) 和 (3):

$$X_c = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v(k) \cos(\frac{2\pi}{N} \cdot k) \quad (4)$$

$$X_s = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v(k) \sin(\frac{2\pi}{N} \cdot k) \quad (5)$$

控制器软件 1 个周波采样 24 点, 即 $N=24$, 代入式 (4) 和 (5), 即可得到 X_c 和 X_s 的值, 再代入式 (6) 得到电压和电流的有效值:

$$X = \sqrt{X_c^2 + X_s^2} \quad (6)$$

利用 X_c 和 X_s 还可以计算得出电压和电流的夹角, 进而计算线路的功率参数。利用 U 的 X_c 和 X_s 还可以计算得出交流电信号的相位角, 进而判断相序, 正确控制电机的正转和反转。此外, 计算结果还可以对电机过载、堵转、短路进行保护, 对电机启动、保护过程进行录波, 以便对电机故障原因进行定量分析。

4 实验结果与分析

在完成控制器软硬件设计之后, 在实验室使用科陆 CL301A 精密交流稳压源对交流采样部分的精度进行了测

量, 测量结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 周波信号测量结果

低周波段			高周波段		
施加值 /V	显示值 /V	误差 /ms	施加值 /A	显示值 /A	误差 /ms
48.00	47.983	0.007	52.00	52.005	-0.002
48.50	48.506	-0.004	51.50	51.496	0.002
49.50	49.514	-0.006	50.50	50.507	-0.003
49.80	49.811	-0.003	50.20	50.210	-0.004
49.90	49.893	0.003	50.10	50.091	0.004
49.95	49.932	0.007	50.05	50.042	0.003
50.00	50.011	-0.004	50.00	49.988	0.005

为了分析方便, 表 1 显示的误差为电网周波周期的绝对误差, 标准源设定交流信号的频率, 控制器显示频率和周期值, 通过计算比对周期的绝对误差。由表 1 周波信号测量结果可以看出最大偏差为 $7 \mu\text{s}$, 验证了控制器周波信号测量精度的稳定性, 较项目组先前实现的边沿触发, 软件中断服务程序飞读计数器的方法优势明显。

表 2 三相交流信号测量结果

相别	电压			电流		
	施加值 /V	显示值 /V	误差 (%F)	施加值 /A	显示值 /A	误差 (%F)
A	0	0	0.00	0	0	0.00
	50	49.79	-0.10	1	1.013	0.26
	100	98.58	-0.19	2	2.014	0.28
	150	149.64	-0.16	3	3.010	0.20
	200	200.25	0.11	4	3.988	-0.24
	220	220.40	0.18	5	5.020	0.40
B	0	0	0.00	0	0	0.00
	50	49.63	-0.17	1	1.012	0.24
	100	99.74	-0.12	2	2.015	0.30
	150	149.66	-0.15	3	2.978	-0.44
	200	199.70	-0.14	4	3.984	-0.32
	220	219.79	-0.10	5	4.985	-0.30
C	0	0	0.00	0	0	0.00
	50	50.35	0.16	1	1.014	0.28
	100	99.68	-0.15	2	1.983	-0.34
	150	149.62	-0.17	3	2.980	-0.40
	200	199.70	-0.14	4	3.986	-0.28
	220	219.57	-0.20	5	4.979	-0.42

从表 2 三相交流信号测量的结果来看, 交流采样的 F 级测量误差都在 $0.5\%F$ 之内, 电压采样的精度高于电流, 0 点由于采取的零漂处理, 无法测出误差。表 1 和表 2 的测量结果表明该项目控制器交流信号采样的实现技术达到了预期的效果。

5 结束语

针对一款隔离开关控制器交流信号采样的技术方案存

在的问题,采用了MCU内置的ADC系统,并借助MCU的通用定时器GPTM,设计实现了一种软同步交流采样技术方案。根据实验测量结果得出其采样精度可以达到0.5%F,满足了技术规范书的要求,同时降低了控制器产品的采购成本。进一步,将提升单周波内的采样次数,争取实现采样精度达到0.2%F的目标,使得这一交流采样技术在协作单位的测量控制器产品设计中推广应用。

参考文献:

[1] 杨丽徒,曾新梅,刘蓉. 变电站电气一次设备智能化问题的研究综述[J]. 高压电器,2012,48(9):99-103.
 [2] 张志鹏,梁猛,郭朝云. 1000 kV 变电站智能化方案研究[J]. 电力建设,2015,36(5):99-104.
 [3] 罗理鉴,黄少锋,江清楷. 智能变电站智能一次设备框架设计[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):120-124.
 [4] 李敬如,宋璇坤,张祥龙,等. 智能变电站一、二次设备集成技术[J]. 电力建设,2013,34(6):16-21.
 [5] 黄国兵,刘小芳,李宁. 嵌入式系统抗电磁干扰体系研究与实践[J]. 计算机测量与控制,2016,24(7):208-211.
 [6] 李玉川. 隔离开关控制器故障录波与波形分析[D]. 西安:西安工程大学,2018.

(上接第145页)

[8] Shikha Gautam, Brijendra Singh. Assessing the Theoretical Impact of Design Patterns on Software Quality [J]. Software Quality Professional, 2018: 37-47.
 [9] Giovanni Guizzo, Thelma Elita Colanzi, Silvia Regina Vergilio. Applying design patterns in the search-based optimization of software product line architectures [J]. Software & Systems Modeling, 2019, 18(2): 1487-1512.
 [10] Ashish Kumar Dwivedi, Anand Tirkey, Santanu Kumar Rath. Software design pattern mining using classification-based techniques [J]. Frontiers of Computer Science, 2018, 12(5): 908-922.
 [11] 钟睿. 设计模式在软件设计中的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2018(14): 27.
 [12] 唐红祥,花梦颖,高文明. 气象资料信息化软件的设计及应用 [J]. 吉林农业, 2018(21): 113.
 [13] 章威,张杰,蒋曼. 地面气象综合观测业务软件的使用要点分析 [J]. 科技风, 2018(25): 71.
 [14] 万蓉,肖艳姣,王斌. 未来的水文气象观测平台 [J]. 气象科技进展, 2018(4): 42-43.
 [15] Emma Dixon, Jeffrey W. Bertrand, Kapil Chalil Madathil. An empirical study to investigate the efficacy of collaborative immersive virtual reality systems for designing information architecture of software systems [J]. Applied Ergonomics, 2019: 175-186.

[7] 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.
 [8] 孙冬娇,夏江涛,张闯. 六通道同步ADC与MSP430的接口设计 [J]. 兵器装备工程学报, 2014, 35(1): 128-131.
 [9] 周启龙,李伟,徐明虎. TMS320F2812的多通道高速同步交流采样设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012, 12(4): 33-35.
 [10] Texas Instruments. Stellaris® LM3S9D92 Microcontroller DATA SHEET [EB/OL]. <http://www.ti.com/stellaris>, 2007.
 [11] 陈思宇,刘锐鹏. 采样法交流电参量测量的误差分析 [J]. 电子设计工程, 2015, 23(20): 120-122.
 [12] 丁海飞,王红亮,张会新,等. 基于ADS8365的多路数据采集存储系统设计 [J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(1): 81-84.
 [13] 张红. 电力信号同步采样算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 91-96.
 [14] 潘文诚. 工频信号测量中参数自寻优智能采样法的研究 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(6): 66-70.
 [15] 白莎,潘晨玥,熊思宇,等. 考虑带外干扰的电力系统频率测量算法 [J]. 电网技术, 2019, 43(3): 17-24.
 [16] Sebastian Steinau, Andrea Marrella, Kevin Andrews, Francesco Leotta, Massimo Mecella, Manfred Reichert. DALEC: a framework for the systematic evaluation of data-centric approaches to process management software [J]. Software & Systems Modeling, 2019, 18(4): 2679-2716.
 [17] Ali Sedaghatbaf, Mohammad Abdollahi Azgomi. SQME: a framework for modeling and evaluation of software architecture quality attributes [J]. Software & Systems Modeling, 2019, 18(4): 2609-2632.
 [18] 闵军,覃凤清. 基于闭包封装和序列展开实现“可选用参泛型抽象工厂” [J]. 软件工程, 2018(9): 18-22.
 [19] 李绍华,冯晶莹. 基于抽象工厂模式的科研项目管理系统的设计 [J]. 电脑知识与技术, 2017(20): 78-80.
 [20] 葛萌,欧阳宏基. 工厂设计模式的研究与应用 [J]. 计算技术与自动化, 2017(2): 136-140.
 [21] 胡文娟. 探究计算机软件中的插件技术 [J]. 信息系统工程, 2016(11): 84-85.
 [22] 宋文娟. 基于插件技术的油藏模拟软件底层框架设计 [J]. 科技视界, 2017(1): 318-330.
 [23] 丰朋. 一种插件式联机交易处理框架 [J]. 电脑知识与技术, 2017(21): 1-4.
 [24] 吴频频,李长明. 基于百度地图的农业气象在线监测平台的设计与实现 [J]. 河南科技, 2018(9): 23-25.