

基于 Cortex-M3 处理器的风电智能箱变交流采集模块设计

朱华婧, 袁 博, 童欲豪, 孙 锋

(南京国电南自风电自动化技术有限公司, 江苏 南京 210032)

摘 要: 介绍了一种应用于风电电气的智能交流采集模块, 该模块基于 Cortex-M3 内核的微控制器 STM32 进行设计。详细阐述了它的功能特点、工作原理、采用过采样技术来提高微控制器自带 ADC 精度的基本原理及所采用的测量算法。结合微控制器特性, 给出了具体的软件实现方法, 并对其进行了测试。实验证明该模块交流采样精准, 实时可靠, 性能稳定, 具有良好的推广应用价值。

关键词: STM32; 数据采集; 过采样; 算法

0 引言

当前, 国内外风电场均按“少人值守”的运行管理方式设计, 整个风电场的集控室设置在升压站侧, 35kV (或 10kV)、110kV 微机保护测控装置统一组建成升压站综合自动化系统, 进而通过远方调度来实现对风电接入点的“遥信、遥测、遥控、遥调”功能。由于风电箱变距离集控室较远, 又非常分散, 一直以来, 升压站综自系统都无法实现对风电箱变的监视和控制, 使箱变系统成为风电场的信息孤岛和监控盲区。而作为风机发电的第一个变电环节, 实现对风电箱变上述信息的远程管理和自动化监控, 满足风电工程“少人值守”的运行管理方式, 已经势在必行。

基于此, 采用新的设计模式, 选择高性能的嵌入式微控制器, 研究并开发能够实时、快速、准确地采集与处理箱变的多路电压、电流信号, 并具有高速度、高精度、低功耗等特点的交流采集模块具有突出的使用和参考价值。

1 ARM Cortex-M3 内核与 STM32F103VCT6

ARM 公司最新一代、效率最高的 32 位内核 Cortex-M3, 是 ARM 首次针对低成本应用提供技术, 并且结合了多种突破性技术, 大大减少了内存的使用, 并在极小的 RISC 内核上提供业界领先的功耗和性能。该处理器拥有独立的指令总线和数据总线, 数据访问不再占用指令总线, 其内部还附赠了很多调试组件, 用于在硬件水平上支持调试操作, 如指令断点、数据观察点等, 另外为了支持更高级的调试, 还有其它可选组件, 包括指令跟踪和多种类型

的调试接口。ARM Cortex-M3 处理器紧凑地结合了执行 Thumb-2 指令的高效 32 位哈佛微体系结构和系统外设, 包括 Nested Vectored Interrupt Controller 和 Arbiter 总线, Thumb-2 技术较纯 32 位编码技术减少使用 26% 内存, 降低系统费用, 同时较 16 位编码性能提高了 25%, 通过降低时钟速度, 提供更低的功耗。芯片上集成大幅度提高中断响应的紧密耦合嵌套向量中断控制器, 实现了 Tail-Claining 中断技术, 该技术是一项完全基于硬件的中断处理技术, 把中断之间延迟降到 6 个 CPU 周期, 在实际应用中可减少 70% 中断。此外, 处理器内核芯片还具有在每一个写操作中修改单个数据位的独立位操作、分支指令预测, 单周期乘法、硬件除法等功能。

STM32F103VCT6 微控制器以实现出色的性能为设计目标, 提供强大的计算和控制能力, 同时内嵌了众多模拟和数字的外设, 具有集高集成度、低功耗、易用性和低成本于一身的优势, 使用新内核的 Thumb-2 指令集, 可以把代码容量降低 45%, 几乎把应用软件所需内存容量降低了一半。

2 硬件设计

本模块采用的意法半导体 STM32F103 系列处理器。交流采集模块的硬件电路设计主要由信号滤波电路、测频电路、采集电路和 I²C 通信电路等组成。其中, 输入信号包括三路相电流 I_a 、 I_b 、 I_c 和四路相电压信号 U_a 、 U_b 、 U_c 、 U_0 。输入电压、电流信号首先经过电流、电压传感器的变换和隔离, 再叠加微控制器参考电压最后转换成特定的电压信号后通过低通滤波, 以消除信号中的高次谐波分量和噪声, 最后经过滤波的信号送至微控制器自带的模数信号

转换器进行采样保持。硬件流程图如 1 所示。

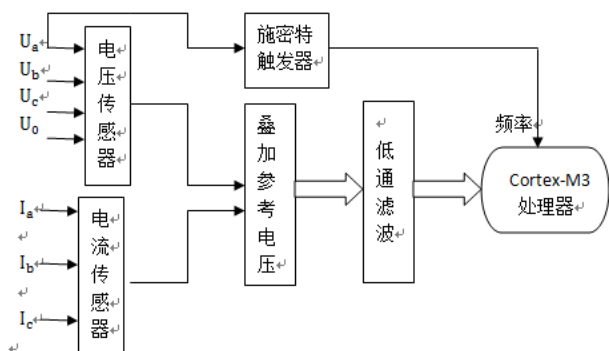


图 1 硬件结构框图

为实现高速度、高精度的信号采样，采样频率的选取尤为重要：根据 Shannon 采样定理，采样频率应该大于信号中最高频率分量的 2 倍，否则会产生混叠，同时为防止软件测频带来的开环误差，本模块设计了硬件测频电路以满足精确的采样频率。测频电路选择 UA 相电压作为输入信号，经施密特触发器将其转换成方波信号送至微控制器进行软件计算，以得到输入信号的实时频率。

3 软件设计

本模块利用 STM32 内部的模数转换器来实现信号的采样，为实现电压、电流信号的同步采样，提高信号的采样精度与计算速度，该模块设计、开发了多种优化算法，其中主要包括频率测量算法、过采样算法、快速傅里叶变换算法等。

3.1 基于 STM32 定时器捕获功能的频率测量算法

将测频电路送出的方波信号作为微控制器的输入，分别对定时器（选择 Timer4）和 GPIO 进行初始化。将定时器设置为下降沿的输入捕获模式，检测到每一个边沿都触发一次捕获，分频器的值设为 560，即计数器的时钟频率设为 100kHz（计数器频率=CPU 主频/定时器分频数）；对应的 GPIO 口设置为浮空输入模式。中断处理部分用时钟频率除以计数器的值便得到实时的信号频率。

3.2 提高微控制器自带 ADC 精度的过采样算法

STM32 内部自带 12 位的逐次逼近型 ADC。ADC 的结构见图 2，图中 ADCCLK 为 ADC 时钟，在 CPU 时钟为 56MHz 的情况下，ADCCLK 可达 14MHz。在最高速转换的情况下（采样时间设置为 1.5 个周期），只需要 14 个 ADC 时钟周期就能完成一次采样，因此可达到 1Msps 的采样速度（ADC 总的转换时间=采样时间+12.5 个周期），该 ADC 还

具有自动校验功能，可以显著地减小采样的误差。经验表明，这种自带 12 位的 ADC 往往满足不了电力系统对采样精度的要求，通过引入过采样技术，能够有效地增加数据采样精度，并且解决了使用外接专用 ADC 带来的成本问题。根据过采样理论，本模块中为将采样精度提高至 14 位，每个输入信号过采样 16 次，将这 16 次采样值相加的结果右移 2 位得到的最终采样值存入采样数组。

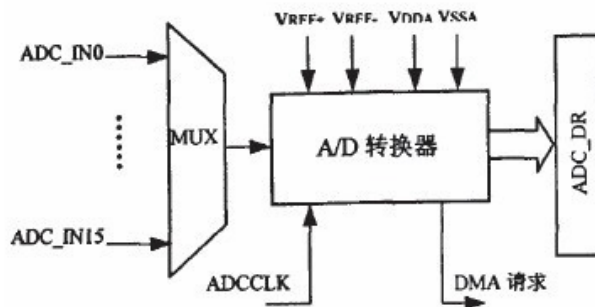


图 2 STM32 内部 ADC 框图

具体的软件设计主要包括系统初始化和中断处理两部分：

系统初始化主要对 STM32 的 CPU 时钟、ADC、DMA、定时器进行初始化。工频 50Hz 的输入信号每周 64 点采样，需要至少 $50 \times 64 = 3.2\text{kHz}$ 的采样频率。通过将 CPU 时钟设为 56MHz，ADC 时钟分频系数设置为 10，转换时间设为 1750 个 ADC 时钟周期，使得 ADC 的采样率为 3200Hz，既能满足采样率的要求，又不会占用 CPU 时间。本模块共设计了 7 路模拟信号的输入，为保证电力系统电压、电流同步采样，电压通道分配至 ADC1 进行轮流采样，电流通道的分配至 ADC2 进行轮流采样，两个 ADC 均设置为独立工作模式。

在中断处理程序中，将每路信号的 16 个采样值进行过采样处理，并将最终的过采样结果存入每路信号采样的采样数组。

3.3 模块的通信功能

模块的通信部分充分考虑了现今电力系统信息化高速发展的需要，设计采用 IIC 总线通讯方式。IIC（Inter-Integrated Circuit）总线是一种由 PHILIPS 公司开发的两线式串行总线，用于连接微控制器及外围设备，它是由数据线 SDA 和时钟 SCL 构成的串行总线，可发送和接收数据。在 CPU 与被控 IC 之间、IC 与 IC 之间进行双向传送，高速 IIC 总线一般可达 400kbps 以上。

IIC 总线在传送数据过程中共有三种类型信号，

它们分别是：开始信号、结束信号和应答信号。当 SCL 为高电平时，SDA 由高电平向低电平跳变，开始传送数据；当 SCL 为高电平时，SDA 由低电平向高电平跳变，结束传送数据；当接收数据的 IC 在接收到 8bit 数据后，向发送数据的 IC 发出特定的低电平脉冲，表示已收到数据。CPU 向受控单元发出一个信号后，等待受控单元发出一个应答信号，CPU 接收到应答信号后，根据实际情况作出是否继续传递信号的判断。若未收到应答信号，由判断为受控单元出现故障。

3.4 提取基波和谐波分量的快速傅里叶变换算法

根据快速傅里叶变换的核心算法思想：不断地把长序列的 DFT 分解成几个短序列的 DFT，并利用旋转因子的周期性和对称性来减少 DFT 的运算次数。本模块采用了频域抽取的基 2 算法来完成 64 位的离散傅里叶变换，从而算得风电箱变每路电压、电流信号的频谱，以实时监控它的状态，参数和电能质量。

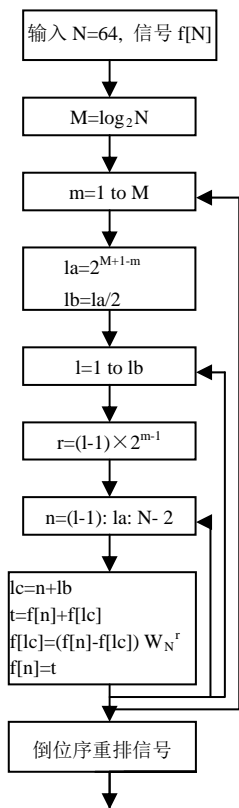


图 3 频域抽取 FFT 程序流程图

频域抽取的基 2 算法流程图如图 3 所示，它的运算规律主要包括蝶形运算单元、同址计算以及倒位序三部分。蝶形运算单元是指序列长为 $N=2^M$ 点的 FFT，有 M 级蝶形，每级有 $N/2$ 个蝶形运算，同一级

中，每个蝶形的两个输入数据只对本蝶形有用，每个蝶形的输入、输出数据节点在同一条水平线上，这样，当计算完成一个蝶形单元后，所得的输出数据可立即存入原输入数据所占用的存储单元。同址运算即经过 M 级运算后，原来存放输入序列数据的 N 个存储单元中可依次存放 $X(K)$ 的 N 个值。

倒位序的程序流程图如图 4 所示，由于 FFT 变换过程中，输出按奇、偶抽取的缘故，如果将序列 $x[N]$ 中标号 n 用二进制值 $(n_0 \cdots n_{M-2} n_{M-1})_2$ 表示，那么在 FFT 信号的输出端， $X[N]$ 的频谱输出序号相应为 $(n_{M-1} n_{M-2} \cdots n_0)_2$ 处，即为倒位序。

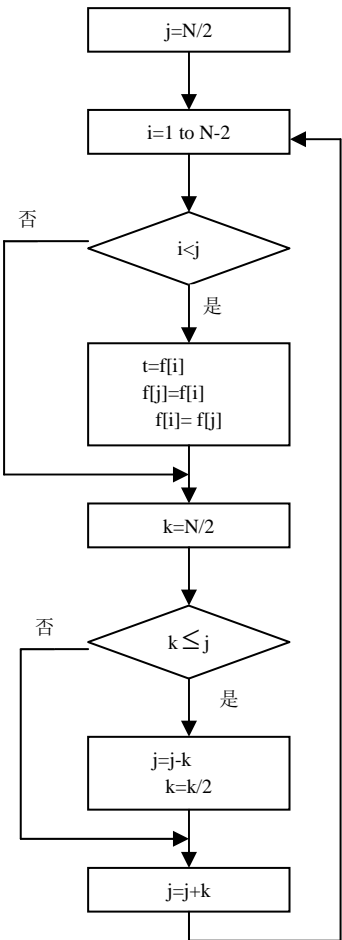


图 4 倒位序程序流程图

3.5 模块的性能与特点

选用精度为 0.05 级的三相交直流程控功率源 DK-51C3 对模块进行全面的软件测试，经过对交流采集模块的总体设计，确定主要性能参数如下。

- (1) 电流、电压测量精度：0.2 级；
- (2) 功率、功率因数测量精度：0.5 级；
- (3) 频率测量精度精度：±0.01Hz。

4 结论

本模块的设计最终应用到南京国电南自风电自动化技术有限公司研制的 WPA900 风电箱变智能测控装置中,实验结果表明,本文介绍的几种算法的运用大大提高了采样速度与采样精度。

利用 Cortex-M3 强大的数据处理能力,配合算法的优化设计,高效、实时、可靠地完成了多路模拟量的数据采集与分析计算,实现了对风电场电气参数的实时监测,为数字化、智能化风电场奠定了基础。与本模块相结合的 WPA900 风电箱变测控装置也已进入批量化生产,在部分工程现场得到应用。

参考文献:

- [1] 王永宏,徐炜,郝立平. STM32 系列 ARM Cortex-M3 微控制器原理与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.

- [2] 张喜俊,牟龙华. 基于 ARM 的智能保护测控装置的研究[J]. 电气开关,2006,44(6).

- [3] 张举. 微机型继电保护原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.

- [4] 祝贺,徐建源,张明理,等. 风力发电技术发展现状及关键问题[J]. 华东电力,2009,37(2):314-316.

作者简介:

朱华婧(1986-),女,江苏盐城人,工程师,从事电力系统继电保护的研究开发工作;

袁 博(1982-),男,辽宁铁岭人,工程师,从事电力系统自动化研究发展工作;

童欲豪(1982-),男,江苏南京人,工程师,从事电力系统自动化研究发展工作;

孙 锋(1975-),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力系统自动化研究发展工作。