

面向嵌入式系统的有效值快速算法

马文博¹, 罗丹², 蒋玉华¹, 张亿宗¹, 廖志贤¹, 黄国现¹

(1. 广西师范大学 电子与信息工程学院/集成电路学院, 广西 桂林 541004;
2. 桂林学院 理工学院, 广西 桂林 541006)

摘要: ADC 采样交流波形是嵌入式系统的一项重要应用, 当采集到的电压波形并非标准函数波形 (如正弦波、三角波等) 的畸变波形时, 不能直接通过简化数学公式或平均响应法求得均方根值; 为得到任意波形的均方根值, 首先需要求出该波形的频率 (或周期); 在传统算法中, 需要进行 FFT (快速傅里叶变换), 该算法需要大量内存空间和较高时间复杂度, 且只能进行 $2N$ 个点运算, 精度和分辨率受限; 因单片机片上资源有限, 该算法并不适合多路实时运算; 为改进以上不足, 设计了一种峰值 (谷值) 查找算法, 该算法拥有 $O(n)$ 时间复杂度, 实时性好; 通过该算法寻找采样波形中三个峰值点, 确定波形的其中一个周期, 进而计算得到均方根值; 相比 FFT 算法, 该算法运行速度提升 93 倍, 空间复杂度降低为 FFT 的 $1/300$, 且在实际应用中运行稳定可靠, 平均误差低于 0.6% 。

关键词: 嵌入式; STM32; 峰值查找; 有效值; 任意波形

Fast Algorithm of RMS Oriented to Embedded Systems

MA Wenbo¹, LUO Dan², JIANG Yuhua¹, ZHANG Yizong¹, LIAO Zhixian¹, HUANG Guoxian¹

(1. School of Electronic and Information Engineering/School of Integrated Circuits,
Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;
2. Institute of Technology, Guilin University, Guilin 541006, China)

Abstract: The alternating current (AC) waveform of analog to digital (ADC) sampling is an important application of embedded systems. When a collected voltage waveform is not a standard function waveform (such as sine wave, triangle wave, etc.), the root mean square (RMS) of waveform cannot be directly calculated by a simplified mathematical formula or average response method. In order to get the RMS value of any waveform, the frequency (or period) of waveform is firstly calculated; In traditional algorithms, RMS value needs to be performed by fast Fourier transform (FFT), which requires a large number of memory space and high time, and the accuracy and resolution of waveform are limited by the calculation of only $2N$ points; Due to the limited resources of single-chip microcomputer, the algorithm is not suitable for multi-channel and real-time calculation; A peak (valley) searching algorithm is proposed to improve above deficiencies, the algorithm has the time complexity of $O(N)$ and good real-time performance; The algorithm is used to find three peak points in the sampled waveform, determine one of the cycles of the waveform, and then calculate the RMS value; Compared with the FFT algorithm, the running speed of this algorithm is increased by 93 times, the space complexity is reduced to $1/300$, with an average error of less than 0.6% , the proposed algorithm runs stably and reliably, and it can be further promoted and used in practical applications.

Keywords: embedded system; STM32; peak search; RMS; arbitrary waveform

0 引言

有效值、峰值和平均值是广泛应用于电机和电网的重要参数, 对其采集和测量有着十分广泛的应用场景, 其中有效值可以直接反应有功功率大小, 对其进行测量至关重要^[1]。随着越来越多的电气设备接入电网, 电压、电流的波形可能因受到干扰而发生严重的畸变。在许多科学研究和应用场景, 需要实时跟踪这种畸变以消除其带来的不利影响, 因此需要一种稳定可靠的方法来准确测量非标准正

弦波的有效值^[2]。市面常见的数字或指针式万用表的测量方法是依据平均值进行的, 因此其输出结果不是真有效值, 依据此测量原理, 它们只有在测量标准正弦波时结果是准确的^[3]。在现有技术中, 可精确测量有效值的方法有热电偶法、RMS/DC 运算法、数字采样法等, 其中热电偶法、RMS/DC 运算法的原理是将被测信号转换为成比例的直流信号进行测量, 采用该原理无法实时测量每一个周期的有效值; 而数字采样法通过高速 ADC 对波形进行离散

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-16。

基金项目: 2022 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2022KY1574); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202210602080)。

作者简介: 马文博 (2001-), 男, 内蒙古包头人, 大学本科, 主要从事嵌入式系统方向的研究。

通讯作者: 罗丹 (1985-), 女, 广西河池人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事智能电网方向的研究。

引用格式: 马文博, 罗丹, 蒋玉华, 等. 面向嵌入式系统的有效值快速算法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 204-211.

化采样, 并结合有效值的数学定义实现测量^[4]。市面常见的真有效值测量芯片(如: AD637、AD736 等)往往价格高昂、外围电路复杂^[7-10], 并不适合多路测量和大规模生产。

近年来国内外的学者都对有效值的应用和计算方法进行了大量探索。文献 [3] 给出了交流电流有效值的物理意义和真有效值的概念。文献 [5] 提出了一种电压暂降检测方法, 该方法借助有效值对电压暂降的幅值进行测算, 文中指出了有效值算法存在实时性差的缺点, 但对该缺点并未提出有效的解决办法。文献 [6] 基于真有效值检测技术, 利用土壤的介电特性, 设计了一个高频电容式土壤水分传感器。文献 [7] 通过 AD637 芯片设计了一种有效值转换电路, 但相比于单片机通过编程实现, 其硬件相对复杂且成本更高。文献 [12] 对比了 LMC6482 放大器代替二极管的精密整流电路和基于真有效值转换器 AD637 的高精度转换电路的测量精度和实现难度。结论为精密整流电路仅限于标准信号, 而基于 AD637 的转换电路的适用范围更广。文献 [4] 对伺服调速系统的有效值测量方法进行了研究, 并提出了数字离散同步采样法进行信号的采样, 但由于采样间隔和周期需要提前确定, 对频率不稳定的波形进行有效值测量时仍存在较大误差。文献 [11] 针对变频器供电时交流电动机的输入电压和电流波形严重偏离正弦波的问题, 提出一种电参量有效值测量的算法。文献 [13] 指出“有效值”是模块化多电平换流器(MMC)设计过程中的一项重要指标, 文章从理论角度推导了电流有效值的计算表达式, 但并未解决实际场景下采样和数据处理过程中的难点。文献 [14-18] 提出了基于 Harr 小波变换、准同步采样、同步采样等方法实现交流信号的数字测量和精度改进的方法。文献 [19] 指出“有效值”在故障限流器(FCL)中快速判断故障的应用, 并给出微分法、迭代法、全周期采样法等有效值测量方法^[20-21], 但这些方法基于大量采样值进行数学运算, 不适用于需要实时响应的场景。

本文旨在通过嵌入式单片机(如 STM32 系列)的 ADC 转换功能和 DSP 处理, 设计一个高精度、高可靠性的有效值求解算法, 其可适用于任何有峰波形, 只需要少量外部参数即可稳定运行, 其准确度高, 通用性强、扩展性好, 且不需要复杂的外围电路, 调试简便, 为后续各类有效值的应用提供便利。

1 系统结构及原理

为实现有效值的测量, 系统需要对外部信号进行采样。采样电路需要拥有较高精度, 以真实还原被测信号的情况。由于 STM32 单片机 GPIO 只能接受 0~3.3 V 电压信号, 因此还需对输入信号进行预处理和隔离, 以适应不同的外部电压输入, 防止输入不符合上述要求时对系统造成不可逆的损伤。采样模块将经过调理的电压信号输入单片机, 单片机通过 ADC 采样、DMA 传输和适当的滤波程序, 保证采样速度和精度。为完整实现系统功能和人机交互, 还需

要电源电路、按键模块、显示模块。本设计分别采用 STM32F103C8T6 和 STM32F407ZGT6 两款单片机完成设计和算法验证, 并进行对比分析。软件部分主要完成采样、滤波、峰值查找、有效值计算处理, 并采用多种方式优化计算速度和准确性。

STM32F103C8T6 是一款基于 Cortex-M3 内核的 32 位单片机, 最高工作频率可达 72 MHz, 内置 64 K Flash 存储器和 20 K SRAM, 它具有较强的性能, 能够满足多种应用需求。其芯片价格相对低廉, 非多路有效值计算场景下仍能保持较高实时性和可靠性^[22]。

STM32F407ZGT6 是一款卓越的多功能微控制器, 可以满足各种应用需求, 它拥有高性能、低功耗的 32 位 ARM Cortex-M4F 内核, 有高达 168 MHz 的主频, 1 MB 的 Flash 存储器和 192 kB 的 SRAM, 以及丰富的外设资源, 如 ADC、DAC、USB、SDIO、USART、高级定时器等, 同时具有 DSP 单元和硬件单精度浮点运算单元(FPU), 可以加快 RMS、FFT 等数学运算的速度^[23-24]。

本设计中主要用到主控芯片中的 ADC 采样和 DSP 内核, 上述两款单片机可完全满足设计需求需求, STM32F407 拥有更高主频、更大 ROM 和 SRAM 和独立的 DSP 处理单元、FPU 单元, 可以更加快速地完成本算法, 并留有一定扩展性。

2 硬件结构

系统硬件主要由 STM32 单片机最小系统、电源电路、信号输入与调理电路以及部分人机交互模块组成。

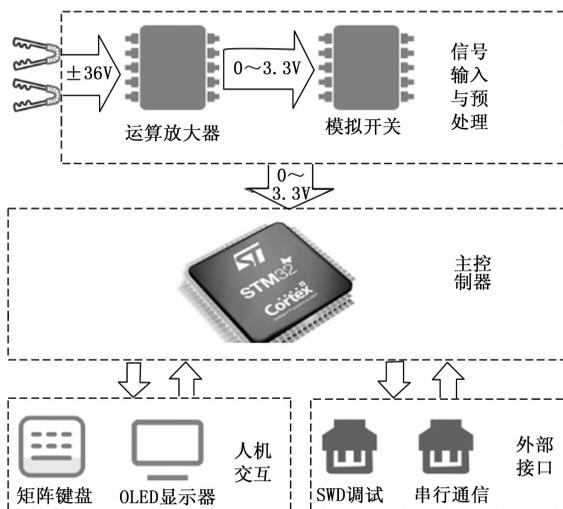


图 1 系统硬件整体框图

2.1 电源电路

系统电源可由外接 6~20 V 供电、7.2 V 锂电池、四节干电池等多种方案提供, 可适用多种使用环境。

系统中运算放大器、模拟开关等器件均采用 5 V 供电, STM32 单片机、OLED 显示屏采用 3.3 V 供电。本电路采用两级 LM1117 LDO 芯片串联组成, 第一级将输入电压转

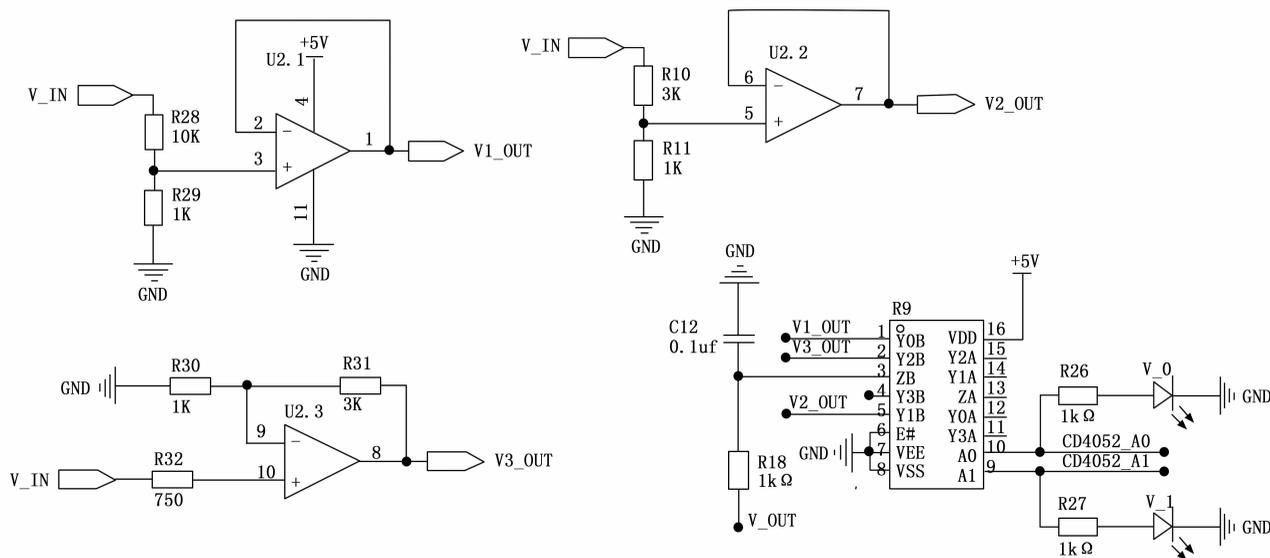


图 2 信号输入与调理电路图

换为 5 V 输出；第二级将 5 V 电压转换为 3.3 V，从而满足系统各模块的供电需求。LDO 芯片具有外围电路简单、低压差下效率高、输出纹波小等优点。

2.2 信号输入与调理电路

为扩大测量信号输入范围，采用运放—模拟开关制作了多档位量程切换器。本电路需要将外部的电压输入按比例放大或缩小，转换为 STM32 单片机 ADC 端口可以接受的 0~3.3 V 电压，并通过模拟开关实现量程切换功能。

运放芯片采用 LM324，该芯片具有 4 路独立运放单元。其中，第一、二路构成跟随器，根据电阻分压公式：

$$U_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i \quad (1)$$

第一和二路输入电压分别衰减为输入的 1/11、1/4。第三路构成同相比例放大器，放大倍数关系为：

$$V_{out} = (1 + \frac{R_{31}}{R_{30}}) V_{in} \quad (2)$$

其中： R_{32} 为平衡电阻，阻值计算方法为： $R_{32} = R_{31} / R_{30}$ 。第三路的放大倍数为 11 倍。

量程切换功能通过模拟开关实现，型号为 CD4052。其 A0、A1 连接至单片机 GPIO 作为控制端，Y0B、Y1B、Y2B 作为输入端，ZB 作为输出端连接至单片机 ADC 端口。单片机控制 A0、A1 以选通不同电压等级输入作为模拟开关的输出。

表 1 设计量程与电阻的关系

量程	分压电阻/运放电阻	调整比例
0~0.7 V	$R_{30} = 1 \text{ k}\Omega$ $R_{31} = 3 \text{ k}\Omega$	4 倍
0.7~9 V	$R_{10} = 10 \text{ k}\Omega$ $R_{11} = 1 \text{ k}\Omega$	1/4
9~36 V	$R_{28} = 10 \text{ k}\Omega$ $R_{29} = 1 \text{ k}\Omega$	1/11

2.3 单片机最小系统

单片机最小系统包含 STM32 主芯片、复位电路、SWD

下载调试接口、晶振电路等。STM32F103C8T6 与 STM32F407ZGT6 外围电路基本一致。

2.4 按键模块

设计选用 4 * 4 矩阵键盘，从而实现人机交互输入功能，并方便系统调试。该键盘引出 4 条行线，4 条列线，分别连接至单片机 GPIO 接口，用于行列扫描以判断键值。

2.5 显示模块

系统通过 OLED 显示屏向用户展示系统运行时的各项参数和计算结果。

显示模块采用中景园电子 1.91 英寸 sh1108OLED 显示屏，其显示分辨率为 128 * 160。接口类型为 spi。图 3 为该模块的电路图。OLED 有机发光二极管 (organic light emitting diode)：即有机电激光显示，指的是基于电流的作用，有机发光材料与有机半导体材料中的载流子符合及注入使得有机材料发光的技术^[25]。

3 软件设计

有效值获取算法通过 STM32 系列单片机进行验证。软件编写过程分为初始化代码生成和主程序逻辑代码编写。其中初始化代码配置采用 STM32CubeMX 工具生成 HAL 库代码。该工具通过图形化界面直接生成 STM32 初始化代码，相比于标准库方便快捷，易于维护。主程序基于 STM32cubeMX 生成的 HAL 库初始化代码，添加逻辑代码完成。该程序采用 C 语言作为编程语言，基于 Keil 软件进行编译和调试。其主要目的是实现量程切换电路的控制、测量结果滤波、峰值点查找、有效值计算、按键状态读取、送入 OLED 屏幕显示等。

3.1 初始化配置

- 1) 矩阵键盘行线配置为输出，列线配置为输入。
- 2) 将 System core → RCC → High Speed Clock (HSE) 配置为 “CrystalCeramic Resonator” 即将系统时钟来源配

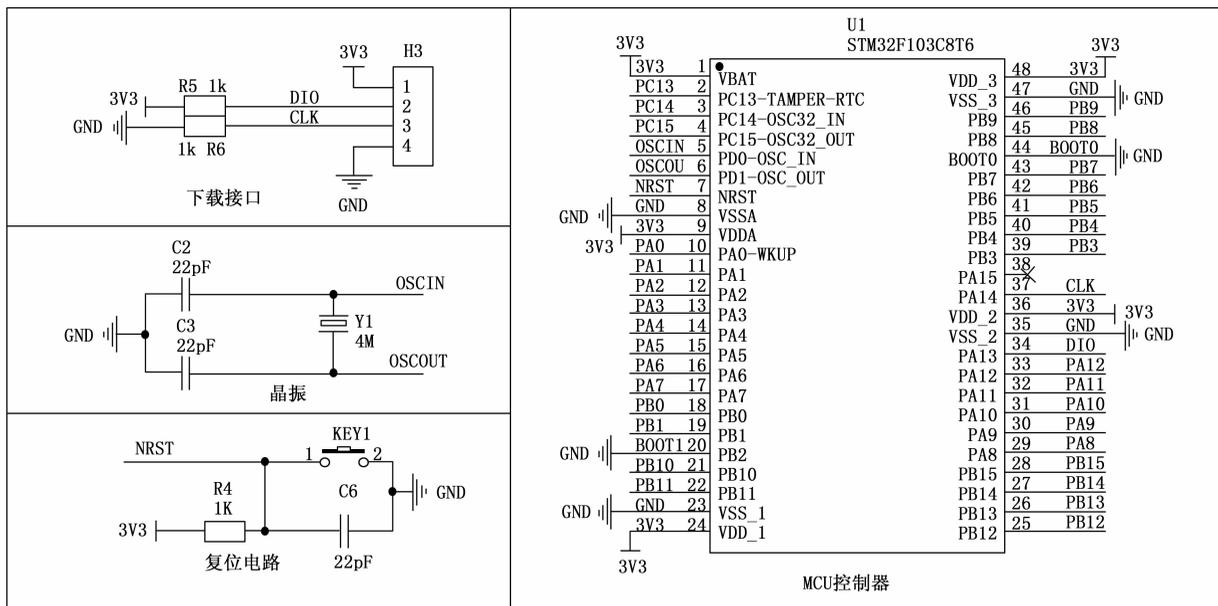


图 3 STM32F103C8T6 最小系统的电路图

置为外部时钟; 将 Clock Configuration→Input frequency 配置为 8 MHz, 将 Clock Configuration→HCLK (MHz) 设置为 168 MHz (对于 STM32F1 系列应设置为 72 MHz)。

3) 使能 ADC1 通道 0 用于输入电压信号采样。ADC 配置为独立模式, 禁用扫描, 使能 DMA 传输。为尽可能提高精度, ADC 使用 12 bits 模式以提供 4096 级精度, 采样时间设置为 28 cycles, 以尽可能平衡采样时间过长造成的采样点数不足和采样时间过短带来精度不足的问题。触发方式设置为由定时器 2 触发。

4) 定时器 2 配置。定时器预分频值设置为 168, 计数值设置为 200-1。当前系统时钟配置为 168 MHz, 根据式 (3):

$$f_{\text{定时}} = \frac{f_{\text{时钟}}}{\text{psc} \times (\text{period} - 1)} \quad (3)$$

计算得到, 当前定时频率为 5 kHz。该数值可根据实际需要适当修改, 对于较高频率信号, 该定时频率应适当增加, 但不能超过 ADC 单次采样所需的时间, 否则会造成采样结果错误。对于较低频率信号, 该定时值应适当降低, 以采样到更多周期的信号 (本算法至少保证采集 1 个完整周期波形即可正常运行)。

3.2 主程序设计

为保证有效值计算的准确性, 其输入必须为波形的一个或多个整周期。而如何准确快速找出一列未知波形的整周期是有效值计算过程中尤为关键的一步。常见处理方案有 FFT (快速傅里叶变换法)、过零比较法等。FFT 由于算法中需要进行大量乘法和加法运算, 在单片机等运算资源有限的场合下, 可用性大大降低。过零比较法可以显著降低单片机运算量, 但该方法仅对波形过零时敏感, 且需要硬件电路支持。对于较为复杂的波形, 其仍存在明显不足,

如图 4 所示, 波形存在多个过零点, 过零比较方法不适用。本文主要讨论通过峰值查找算法, 实现对一个 (或多个) 完整周期的提取。通过寻找一个周期中三个峰值, 即可得到一个完整波形的区间。

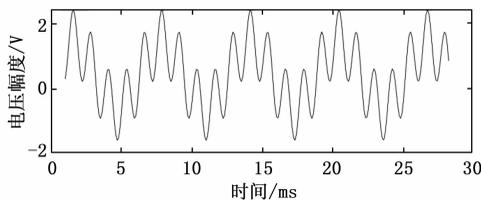


图 4 波形示例

该算法可用 MATLAB 中 findpeaks () 函数实现。该函数为尽可能保证通用性, 进行了大量冗余判断, 在 MATLABr2021b 版本中, 代码量超 1 130 行。对于单片机系统, 需要更加精简的 C 语言代码实现, 从而降低时间、空间复杂度。

算法分析: 为确定峰值, 实际上需要找到波形中一系列点 x , 满足如下关系:

$$x > x[n-1] \&\& x > x[n+1] \quad (4)$$

算法运行时, 首先判断是否满足上述条件, 将满足该条件的点设置为峰值参考点。之后找出峰值参考点中的最大值, 判断每一个峰值参考点是否数值上相距最大值过远 (即大于某个人为指定的阈值); 判断该参考点与上一参考点距离是否小于峰值间隔阈值 (该阈值由人为指定, 一般通过预先判断输入类型和频率范围, 从而确定峰值最小间隔), 二者符合其一则判定为次高峰, 而忽略不做处理。否则将该参考点标记为峰值点, 并继续重复执行上述过程, 直到遍历结束。

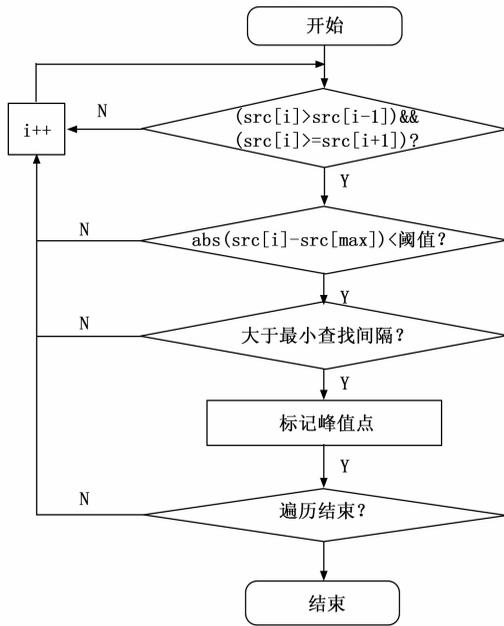


图 5 峰值查找算法流程图

上述算法执行结束后，将得到所有波形峰值点的数组下标。随后取出波形中的三个峰值点，即可确定波形的一个周期。

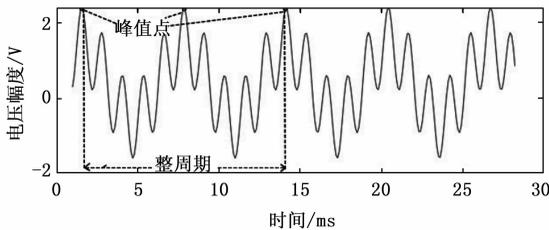


图 6 峰值查找结果示例

完成完整周期查找后，即可进行均方根值计算。根据有效值定义式 (5)：

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (5)$$

式中， T 为信号的周期。其离散化公式为：

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2}{N}} \quad (6)$$

式中， N 为参与计算的采样点数， X_i 为采样信号在第 i 次采样时刻的瞬时值。

根据式 (5)、(6) 计算原理，当且仅当输入为一个或多个完整周期时才能得到准确的结果。利用峰值查找的结果，即所有波形峰值点的数组下标，完整周期长度 N 可通过如下方法求得：

$$N = Num[n+2] - Num[n] \quad (7)$$

式中， Num 为峰值点下标数组， n 为起始点。在图 7 的结果中， $n=1$ 。

随后需要提取源数组中 $Num[n]$ 至 $Num[n+2]$ 区段作为均方根值计算的输入数组，具体可通过如下 C 代码实现：

```
for (int i = Num[n]; i < Num[n+2]; i++)
    RMS_In[i-Num[n]] = Src[i];
```

代码主要功能是将源波形数组中一个整周期 $Num[n]$ 至 $Num[n+2]$ 区段各个数值转存入新数组中，其中 RMS_In 为均方根值计算的输入数组， Src 为源波形数组。

均方根值在嵌入式处理器中实际计算过程可通过两种方案实现：

方案 1：通过 DSP 库内置函数：

```
arm_rms_f32 (float32_t * pSrc, uint32_t block-
Size, float32_t * pResult)
```

参数 1 为均方根值计算的输入数组 RMS_In ，存放一个或多个整周期波形全部采样点的数值；参数 2 为数组长度 N ；参数 3 为函数输出变量指针。调用该函数后 $*pResult$ 所指内存空间将产生均方根值计算结果。

方案 2：根据定义式 (6) 进行计算。

相比于方案 2，方案 1 经过软硬件优化，保持结果准确性的前提下运算速度更快。

4 实验验证与对比分析

4.1 试验方案

本算法最终目标是实现应用于嵌入式处理器的任意有峰波形的有效值计算功能，验证分为计算机模拟理论准确性验证及嵌入式处理器运行验证，分别设计不同实验以全面验证算法可靠性、准确性、时空复杂度等。

在时空复杂度测试中，将本文提出算法与快速傅里叶变换法（传统算法）进行对比。快速傅里叶变换法（FFT）主要用于解决离散傅里叶变换（DFT）中计算量过大的问题，大幅降低了借助于计算机的傅里叶变换求解过程中的算法复杂度^[26]。在 STM32 系列单片机中调用 DSP 库中的 FFT 函数即可求得波形的频谱，频谱中除直流分量外第一个幅值明显较高的点位即可认为整体波形的频率点。根据式 (8)：

$$f = n \times \left(\frac{F_s}{N} \right) \quad (8)$$

可求得算法所需的频率参数，式中， n 为 FFT 输出数组下标， F_s 为采样频率，采样点数 $N=2^n$ ，其中 n 需为 4 到 12 间的整数， f 为 FFT 数组下标对应波形的频率。本文取 $n=10$ ，即 $N=1\ 024$ ， F_s 取 $1\ 024$ ，此时根据式 (9)：

$$F_{res} = \frac{F_s}{N} \quad (9)$$

FFT 分辨率为 1 Hz。因此对于非整数频率测量中采用 FFT（传统算法）会引入较大误差。

4.2 算法可靠性验证

波形峰值查找准确性是决定有效值输出结果正确性的关键所在。通过本文编写的 C 语言代码与调用 MATLAB

工具箱中 findpeaks () 函数进行峰值查找、调用 rms () 函数进行有效值计算结果进行对比。处理多组数据, 观察输出结果。算法中均只保留 3 个连续峰值, 其余峰值和次高峰做忽略处理。

测试数据 1: 多 sin 叠加波形

$$y = \sin(8t) + \sin(5t) + \sin t \quad (10)$$

1) MATLAB 程序测试: 圈出的波形位置为查找的有效值所在位置。

输出峰值数组下标: 17, 80, 143

RMS 值: 1.230 5

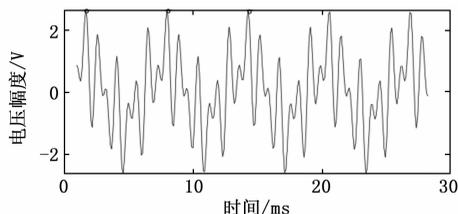


图 7 多 sin 叠加波形峰值查找结果

2) C 语言程序:

输出数组下标: 16, 79, 142

RMS 值: 1.230 466

测试数据 2: Dirichlet (混叠正弦函数) 波形

1) MATLAB 程序测试: 圈出的波形位置为查找的有效值所在位置。

输出峰值数组下标: 62, 125, 187

RMS 值: 0.372 0

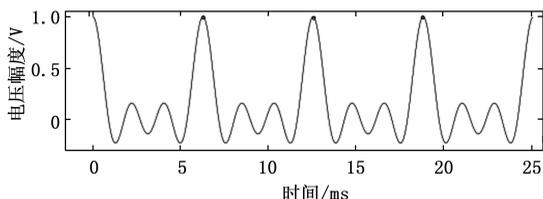


图 8 Dirichlet 波形峰值查找结果

2) C 语言程序:

输出数组下标: 61, 124, 186

RMS 值: 0.372 003

测试数据 3: mstg 函数波形

1) MATLAB 程序测试: 圈出的波形位置为查找的有效值所在位置。

输出数组下标: 401, 801, 1201

RMS 值: 0.872 0

2) C 语言程序:

输出数组下标: 400, 800, 1 200

RMS 值: 0.872 016

注: 因 MATLAB 数组下标起始值为 1, C 语言数组下标起始值为 0, 故 C 语言输出下标值较 MATLAB 输出下标值少 1, 指代数组中的相同数据。

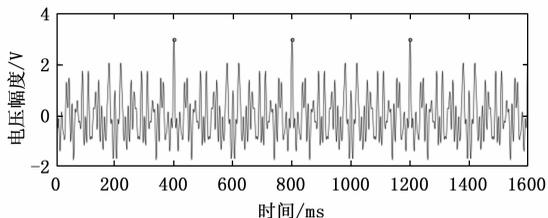


图 9 mstg 函数波形峰值查找结果

测试结果: 对于任意复杂度的有峰波形信号表现出极高准确性和稳定性, C 语言程序与 MATLAB 程序输出峰值点查找结果一致, RMS 值计算结果一致。

4.3 时间复杂度对比

分别使用 STM32F1 系列单片机 (基于 Cortex-M3 内核, 无 DSP 处理单元, 主频 72 MHz)、STM32F4 系列单片机 (基于 Cortex-M4 内核, 有 DSP 处理单元, 主频 168 MHz) 两款单片机, 对一组相同数据进行 FFT 运算 (即传统算法) 求得波形频率, 进而根据采样率换算找出整周期区间, 求得均方根值、使用本文峰值查找算法求得波形一个整周期, 进而求得均方根值, 通过 STM32 仿真器观察 states (指令周期数), 比对二者所需指令周期差异。

表 2 时间复杂度对比

型号	FFT	峰值查找	比对结果
STM32F1	539 033 (0.007 486 57 s)	5 747 (0.000 079 82 s)	相比 FFT 加快 93.793 8 倍
STM32F4	166 957 (0.000 993 8 s)	2 421 (0.000 014 41 s)	相比 FFT 加快 68.961 9 倍

运行峰值查找算法所需时间较 FFT 大幅缩减, 尤其在主频更低、成本更低、无 FPU 和 DSP 处理单元的 STM32F1 系列单片机中, 通过峰值查找的均方根求解算法较传统算法加速效果尤为明显。

4.4 空间复杂度对比

传统 FFT 算法执行时, 需要定义输入数组 (长度为输入数据长度 2 倍)、输出数组 (长度与输入数据长度相同), 而本算法可直接利用源数组作为峰值查找算法的输入, 定义较小数组长度作为算法所找峰值点输出, 算法运行时无需开辟其他内存空间。在源数据长度较长时, 使用峰值查找算法可显著降低空间复杂度, 不考虑 FFT 运行过程中额外内存开销的条件下, 总内存空间节省量为源数组长度 3 倍以上, 有效节省单片机片上内存资源。

4.5 准确性验证

通过 RIGOL DG4000 系列任意波形发生器产生幅值不同的非标准波形信号, 接入上述两款单片机 ADC 端口, 单片机进行采样和计算后, 通过 OLED 屏幕显示有效值数据。通过与 UNI-T UT71C 型号万用表的真有效值测量功能与单

片机测量结果进行对比, 分析测量误差。

表 3 准确度对比

序号	本方案测量值/V	标准表测量值/V	相对测量误差/%
1	0.863	0.851	1.4
2	1.234	1.229	0.41
3	1.895	1.884	0.58
4	3.178	3.204	0.81
5	5.028	4.997	0.62
6	7.165	7.202	0.51
7	9.554	9.465	0.94
8	11.891	11.992	0.84
9	13.942	14.031	0.63
10	15.078	15.002	0.51
11	17.545	17.492	0.3
12	19.958	20.059	0.5
13	21.961	22.089	0.58
14	23.589	23.654	0.27
15	25.485	25.695	0.82
16	27.965	27.891	0.27
17	29.057	29.125	0.23
18	31.856	31.991	0.42
19	33.154	33.207	0.16
20	35.588	35.782	0.54
平均误差:0.57%			

在 20 次模拟实验中, 样机测量结果与 UNI-TUT71C 型号万用表测量结果整体相近, 平均误差为 0.57%。算法对于不同种类的非标准周期波形均能有效识别峰值, 并计算有效值。误差多为随机误差, 信号采样电路、ADC 转换和部分外部因素会引入测量误差, 整体误差可控, 符合实际应用要求。

5 结束语

本文提出的真有效值快速算法首先通过峰值查找确定波形中的一个周期, 然后在一个 (或多个) 整周期中使用 RMS 计算函数计算波形的真有效值。相比于传统的 FFT 求频率, 进而得到周期的办法, 其计算效率有了显著提高, 为单片机片上多路 RMS 值实时计算提供了有效的解决方案。本方案无需任何用于获取频率、周期、RMS 值的外围电路参与, 很大程度上降低了硬件成本, 同时该算法无需满足传统有效值算法中“采样频率须等于交流信号频率的整数倍或有理分数倍”这一硬性条件, 增强了算法适用范围, 可实时获取任意非标准波形的有效值。经与标准仪表对比, 本算法拥有较好的准确性和稳定性, 可进一步推广使用。

参考文献:

[1] 谢 然, 高常进, 窦永磊, 等. 基于真有效值法测量交流电压

信号有效值的仿真研究 [J]. 中国特种设备安全, 2018, 34 (7): 7-11.

[2] 庞吉耀. 一种获得交流信号真有效值方法 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (13): 53-55.

[3] 冯乔春. 真有效值的测量及应用 [J]. 云南电力技术, 2008, 175 (3): 14-15.

[4] 纪海燕, 徐余法, 钟后鸿. 一种针对伺服调速系统输出电参量的有效值测量方法 [J]. 上海电机学院学报, 2018, 21 (3): 32-35.

[5] 张 艳, 殷礼胜, 马瑞卿, 等. 基于复小波变换和有效值算法的电压暂降检测方法 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (10): 74-79.

[6] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于真有效值检测的高频电容式土壤水分传感器 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (8): 216-221.

[7] 陈仁伟, 朱长青, 岳夕彪. 高准确度有效值转换电路的设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2010, 33 (6): 20-22, 26.

[8] 王尧君, 刘 冲, 蒋 慧. 两种测量电压有效值方法的比较 [J]. 中国测试, 2013, 39 (3): 27-30.

[9] 郭志成, 郭 宁, 李晓青. 基于 GPRS 的微电网中蓄电池远程监测系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2021 (3): 35-38.

[10] 石彦华, 唐 建, 张大刚, 等. 基于 ARM 技术的便携式中频功率测量仪设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2022 (4): 105-108.

[11] 王爱元. 一种用变频调速装置的电参量有效值测量算法 [J]. 电机与控制应用, 2013, 40 (5): 49-52.

[12] 陈仁伟, 朱长青, 岳夕彪. 高准确度有效值转换电路的设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2010, 33 (6): 20-22, 26.

[13] 梅 念, 王光达, 陈 钊, 等. 模块化多电平换流器子模块关键组部件稳态电流应力全解析化计算 [J]. 电网技术, 2022, 46 (10): 3712-3720.

[14] 孙俊香. 提高交流信号真有效值测量精度的改进方法 [J]. 电测与仪表, 2011, 48 (11): 20-23.

[15] 徐 昱. 交流信号真有效值数字测量方法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2006 (2): 51-54.

[16] 李华曦, 李敏远. 非正弦波交流电参量实时测量系统的研究 [J]. 电测与仪表, 2007 (3): 13-16, 21.

[17] 蔡佰周, 刘志强, 于丽萍. 变频调速系统的非正弦电参量测量 [J]. 仪表技术与传感器, 1997 (1): 44-46.

[18] 沈国峰, 王 祁, 王 华. 利用小波变换进行有效值测量的研究 [J]. 电测与仪表, 2003 (6): 9-11.

[19] 张志丰, 张 凯, 董 轩, 等. 基于电流有效值实时算法的限流器快速故障辨识方法 [J]. 电气技术, 2022, 23 (7): 81-88.

[20] GONG L, LIU C L, GUO L. Residual adaptive algorithm applied in intelligent real-time calculation of current RMS value during resistance spot welding [C] //2005 International Conference on Neural Networks and Brain, Beijing, 2005: 1800-1806.

[21] WEI C H, LEI S, CHEN W, et al. Research of effective value measurement method in smart grid [C] //2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, 2011: 1611 - 1614.

[22] 岳 骏, 解乃军. 基于 STM32 的物联网智能家居系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2022 (2): 27 - 31.

[23] 江龙韬, 刘怡沛, 张 卓. 基于 ARM 及机器视觉的智能药品运送机器人系统设计与研究 [J]. 计算机测量与控制,

2022, 30 (8): 211 - 217.

(上接第 203 页)
通过数据标准化, 故障诊断产品所采集的反应堆关键设备状态数据资源在统一性、标准性和规范性上得到了极大提升, 数据标准化的效果如表 11 所示。

表 11 数据标准化前后的效果对比

现状	数据标准化前	数据标准化后
文件格式不统一	7 种主要格式	1 种格式“.dat”
文件命名多样化	10 种命名方式	1 种文件命名方法
编码方式不统一	2 种文件编码方式, 2 种字符编码方式	1 种文件编码方式, 1 种字符编码方式
数据类型多样化	12 种数据类型	精简为 7 种, 涵盖 全部所需类型
解析规则复杂	20 项不同规则	1 项通用解析规则, 1 项标准方法“八字节法”

4 结束语

数据标准化主要聚焦于缺乏规范性、统一性的数据资源。本文首先梳理了反应堆关键设备状态数据的数据资源现状, 整理了当前数据资源存在的问题; 然后提出了数据标准化的思路和方法, 从文件格式、文件命名、文件编码方式、文件数据类型、解析规则、数据读取、数据存储等方面进行数据标准化实践, 定义了机组简标规范、文件命名规范、数据编码规范、字符编码规范等标准化规范用以对数据资源进行约束。通过数据标准化实践, 反应堆关键设备状态数据资源的统一性、规范性和标准性得到了极大提升, 充分提高了数据质量和管理的效率。

随着“数字化反应堆”建设的推进和数字化转型的迫切需求, 数据资源将迎来新一轮的使用和研究热潮, 为了提升数据资源的使用效率、增强数据质量, 确保最大限度挖掘数据资源的内在价值, 数据标准化应该作为一种重要的数据管理手段贯穿数据使用的全流程, 避免由于数据资源混乱而造成的数据浪费。除数据标准化以外, 数据管理中还包含了数据安全、数据质量管理、数据资产管理、数据生命周期管理等多方面, 后续可以根据需要在核电故障诊断产品数据资源中进行进一步探索和实践。

参考文献:

[1] 刘才学, 汪成元, 郑武元, 等. 核电站松脱部件监测系统研制 [J]. 核动力工程, 2010, 31 (1): 97 - 101.

[2] 刘才学, 郑武元, 汪成元, 等. 基于中子噪声分析技术的核电

[24] 赵 星. 开启 STM32F4 的 FPU 后对快速傅里叶变换的加速效果 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34 (8): 45 - 47.

[25] 魏路明, 余世刚, 邵笑校, 等. 基于 STM32 和小波自适应滤波算法的生理参数监测系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (2): 76 - 82, 90.

[26] 黄怡恬. 基于 STM32 的 FFT 算法实现 [J]. 中国科技信息, 2021 (12): 76 - 78.

[3] 何 攀, 蒋天植, 刘才学, 等. 基于声发射的压力管道 LBB 监测系统研制 [J]. 核动力工程, 2019, 40 (S1): 59 - 62.

[4] 何 攀, 刘才学, 艾 琼. 核动力主泵振动探测与积分处理方法研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32 (10): 1134 - 1137.

[5] 简 捷, 罗 婷, 刘才学, 等. 核电厂松脱部件报警案例分析 [J]. 核动力工程, 2020, 41 (2): 198 - 202.

[6] 翟嘉琪, 杨希祥, 程玉强, 等. 机器学习在故障检测与诊断领域应用综述 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 1 - 9.

[7] 沈 涛, 李舜酩, 辛 玉. 基于深度学习的旋转机械故障诊断研究综述 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (9): 1 - 8.

[8] 杨乐平, 李海涛, 杨 磊. LabVIEW 程序设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[9] 杨泰波, 刘才学, 何 攀. 基于虚拟仪器的核电站主管道振动监测系统研制 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (10): 13 - 14, 31.

[10] 冯文娟, 毕继鑫, 刘宗霞. 测量数据 DAT 文件格式分析转换及应用实例 [J]. 煤矿现代化, 2020 (1): 103 - 104, 107.

[11] 丰伟伟, 杨世文, 南金瑞, 等. LabVIEW 中 TDMS 文件和 SQL 数据库数据处理速度的研究 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2011 (1): 10 - 12.

[12] 陈 辉, 周自立. 嵌入式系统实验关于大小端转换方法的探讨 [J]. 实验室研究与探索, 2008 (5): 66 - 67, 91.

[13] 钟小莉, 谢旻旻, 李永宁. 文字编码与 Unicode 编码研究 [J]. 经营管理者, 2010 (20): 364.

[14] 杨善超. GBK 汉字编码技术研究 [J]. 福建电脑, 2017, 33 (11): 13, 30.

[15] 米甲·S. 盖尔, 丹尼尔·L. 鲁宾费尔德. 数据标准化 [J]. 网络信息法学研究, 2021, (1): 29 - 63, 235 - 236.

[16] 王印辉, 徐霞军, 任增朋, 等. 核电主数据管理标准化研究 [J]. 核标准计量与质量, 2020 (2): 2 - 9.

[17] 郑晓薇. 二进制字节文件结构特点及在加密算法中的应用 [J]. 计算机时代, 1993 (4): 36 - 38.

[18] 马少怡, 宋素梅, 冷希岗. 浅谈科技期刊文后参考文献英文刊名的缩写规则 [J]. 天津科技, 2008, 35 (6): 86 - 87.

[19] 张鹏伟, 李建文. 数据库系统开发中字符编码问题的研究 [J]. 陕西科技大学学报 (自然科学版), 2013, 31 (5): 139 - 143.

[20] 杨善红. 小议结构体变量的字节对齐 [J]. 民营科技, 2010 (9): 38.

[21] PROF W K. IEEE Standard 754 for binary floating-point arithmetic [D]. Berkeley: University of California, 1997.