

Application Note

F28P55x 与 F28P65x 数字电源应用电子计量库 (E-Metrology Library) 用户指南

Ira Thete
Akshith Pareek

ASM Industrial Applications
ASM Industrial Applications

摘要

现代电气系统需要高精度计量和全面的电能质量 (PQ) 分析，这些任务对传统微控制器在实时处理复杂波形和执行计算密集型算法方面构成挑战。本应用手册介绍了一个专为德州仪器 (TI) C2000™ 实时微控制器设计的定制计量软件库，该库利用其集成的 32 位浮点单元 (FPU32)、三角函数加速器 (TMU) 和内置的 DSP 功能来克服这些挑战。该库提供一系列高精度测量，包括真 RMS 电压和电流、多相有功、无功和视在功率及能量、电能因数、线路频率、电压骤降/骤升检测，以及基于 FFT 的精确总计谐波失真 (THD)，所有测量均使用高精度 32 位浮点运算进行。高效的分离架构将时间关键型后台数据采集（概念上由 ADC 中断驱动）与复杂前台计算分离，从而保持最佳性能。本文重点介绍了 C2000 MCU 的独特优势，例如原生浮点 FFT 执行和专用 DSP 指令，相比通用 MCU，可在对计量和 PQ 应用要求严格的场景中提供卓越的性能和精度。

内容

1 简介.....	2
2 库架构.....	3
3 计量计算.....	4
4 配置和数据结构.....	4
5 校准模块.....	4
6 应用和用例.....	5
7 有用链接.....	6

商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

现代电气基础设施的发展（包括智能电网、可再生能源集成和复杂的工业自动化）对电气参数测量的准确性和全面性提出了越来越严格的要求。精确计量（即测量科学）不再只是基本能耗，它现在还涵盖详细的电能质量 (PQ) 分析，这对于维持电网稳定、延长设备寿命以及提高运行效率至关重要。RMS 电压和电流、有功和无功功率、功率因数、频率和谐波失真等参数有助于深入了解电气系统的运行状况和性能。然而，实现稳健的计量和 PQ 分析设计面临重大的技术挑战。现代电气负载通常为非线性，会导致电流和电压波形失真并产生大量谐波。在实时准确处理这些复杂信号的同时，还需执行如快速傅里叶变换 (FFT) 等计算密集型算法进行谐波分析，或通过精确的点累积计算实现真实 RMS 和功率计算，这对传统微控制器的性能提出了极大挑战。此外，实现计量标准所需的高精度（通常需要使用浮点计算）又增加了一层复杂性，尤其是在资源受限的嵌入式平台上。

2 库架构

为了满足持续功率监控的严格实时要求，并确保不会丢失关键数据，计量库采用高效的分离式处理架构。这种设计将时间敏感型任务与执行频率较低、计算量较大的任务分离开来，优化资源利用率并保持系统响应性。该架构大致分为两个主要处理层：后台处理和前台处理。

后台处理：

以高频率执行（通常与模数转换器 (ADC) 采样率同步），后台处理任务在中断服务例程 (ISR) 内处理。该层的主要职责包括：

1. **原始样本采集**：从 ADC 中读取最新的电压和电流样本。
2. **基本预处理**：对原始采样值执行最少量的时间关键操作，例如进行直流估算和滤波以消除直流偏置。
3. **核心累积**：在指定的测量窗口（通常为一个或多个市电周期）内计算并累积基本点积和运算（例如电压采样平方和、电流采样平方和、电压与电流乘积之和）。这些累积构成了大多数后续计量计算的基础。
4. **数据缓冲和同步**：管理数据缓冲区并准备累加的数据，以便将其安全地传输到前台任务。

后台处理的主要设计原则是尽量缩短 ISR 的执行时间，以保持高采样精度，并允许系统响应其他关键中断。

前台处理：

前台任务在主应用循环中以较低频率运行，一旦后台处理累积了完整的数据块，就会被触发。该层处理计算量更大的计算任务，包括：

1. **检索累加数据**：安全地读取后台任务记录的一致点积集合和其他相关数据。
2. **应用校准**：使用预先确定的校准系数校正原始累积值，以补偿传感器误差及模拟前端的偏差。
3. **计算最终参数**：使用校准后的数据计算整套计量参数，例如 RMS 电压和电流、有功功率、无功功率和视在功率、功率因数、频率、THD 及电压骤降/骤升事件。
4. **能量累积**：对功率值随时间进行累积计算以得到能耗。更新结果：为应用提供最终的校准测量值以进行显示、记录或通信。

数据传输机制：

这种分离架构的一个关键要素是后台 ISR 与前台任务之间可靠的数据传输机制。该库采用同步交接技术，通常称为双缓冲，以保持数据完整性。过程如下：

1. 后台 ISR 会不断使用每个样本的数据更新主要累加器集合。
2. 当一个完整的测量块（例如指定数量的样本或市电周期）累积完成后，后台任务会将这些主要累加器的当前值复制到辅助“已记录”变量集合中。
3. 然后，后台任务设置状态标志，向前台任务发出信号，表示已记录的变量中有一个新的一致数据块已就绪。
4. 在主应用循环中运行的前台任务会定期检查此状态标志。检测到该标志被设置时，系统就知道“已记录”的累加器中存在一组完整且一致的数据。然后，它会继续使用此数据进行计算。

3 计量计算

实际计量计算发生在 *meterology_caluclations.c* 文件中。

1. 此模块包含实施计量算法的数学函数库。
2. 该模块以累积点积、样本计数和校准数据等作为输入。
3. 模块会输出计算出的电气参数 (例如 `calculateRMSVoltage`、`calculateActivePower`、`calculateFrequency_PLL`) 。

4 配置和数据结构

1. 这些文件定义常量 (例如, 标称电压/频率、采样率)、用于启用功能的预处理器宏 (例如, `HARMONICS_SUPPORT`、`NEUTRAL_MONITOR_SUPPORT`) , 以及存储所有计量相关信息的关键数据结构。
2. *metrologyData* : 顶层全局结构的实例会保存所有相位、中性、总计和系统状态的所有数据。
3. *phaseMetrology/neutralMetrology*: 计量数据中的结构, 包含每个相位和中性线的参数 (`params`) 和读数 (`readings`)。
 - a. `params` : 存储配置、后台的中间累积值 (如 `dotProd` 数组)、校准所得的派生值, 以及状态变量 (例如 `PLL`、`骤降/骤升`) 。
 - b. `readings` : 存储最终计算得出的计量值 (`RMS`、`功率`、`PF` 等) 。
4. *calibrationData* (`metrology_nv_structs.h`) : 保存校准系数。

5 校准模块

1. 管理校准数据的加载、应用及概念性存储。
2. *metrology_setup_init* (或 `metrology_setup.c` 中的类似函数) 初始化数据结构并应用初始校准设置, 如相位校正。

6 应用和用例

使用这种基于 C2000 的库来计算计量参数，在数字电源行业及其他多个领域中都有广泛的应用。以下是这些应用的部分示例。

1. 智能电力计

- **计费精度**：对多个相位的 RMS 电压、电流、有功功率 (Wh)、无功功率 (VARh) 和视在功率 (VAh) 进行高精度测量，可确保住宅、商业和工业用户的计费公平准确。
- **电能质量监测**：集成的骤降/骤升检测和 THD 分析提供了有价值的信息，供公用事业机构监测电网运行状况，同时供消费者了解电能质量。这些数据可以被记录并生成报告。
- **负载分析**：可记录详细的能耗模式，帮助公用事业部门开展需求侧管理，并协助用户优化能源使用效率。

2. 电能质量分析仪 (PQA)

- **全面事件检测**：库的骤降、骤升功能是 PQA 的基础。通过记录事件持续的时间和幅度，可以进行详细的事件分析。
- **谐波分析**：基于 FFT 的 THD 计算 ($vTHD_{fft}$ 、 $iTHD_{fft}$) 及其底层的 `find_harmonics` 函数 (来自 `metrology/metrology_calculations.c`) 可提供识别特定谐波阶次及其量级所需的频谱数据，这些数据对于诊断设备过热或干扰等问题至关重要。

3. 工业自动化与控制

- **电机监控和保护**：监测大型电机的电流、功率、功率因数和 THD 可以预测故障、提高效率、并防止相位不平衡或过载等不良工况。
- **能源管理系统 (EMS)**：在工厂和大型设施中，该库可作为分计量单元的核心，提供不同区域或设备的能耗精细数据，从而实现有针对性的节能措施。

4. 可再生能源系统

- **光伏逆变器**：监测交流输出电压、电流、频率、功率和 THD 对于并网光伏逆变器至关重要，这样做有助于确保符合电网规范，并优化功率注入电网的性能。
- **储能系统**：在能量累积逻辑的支持下，测量功率流 (输入/输出) 及电能质量对于储能系统中的电池管理和电网交互至关重要。

5. 电动汽车 (EV) 充电站

- **准确的能量分配**：精确测量输送到 EV 的能量对于计费来说至关重要。
- **电能质量影响**：使用库中的 THD 和电压骤降/骤升功能，可监测车外 EV 充电对本地电网的影响，包括谐波注入和电压稳定性。
- **智能充电**：实时功率数据可使智能充电算法根据电网状况或电价调整充电速率。

6. 数据中心

- **配电单元 (PDU) 监控**：数据中心的 PDU 需要精确监控机架或服务器级的功耗，用于容量规划、计费和效率优化 (例如，电能使用效率 PUE)。
- **输入电源质量**：保证向敏感 IT 设备提供的电源质量至关重要。该库可以监控可能影响服务器可靠性的骤降、骤升和谐波。

C2000™ MCU 的实时处理能力与该计量库中的综合算法相结合，为这些应用提供了一个多功能平台。

7 有用链接

可 [在此处](#) 查看一些与电子计量库 (E-Metrology Library) 相关的链接。此处讨论了用户配置、库内存使用情况，以及这些计量参数计算原理等内容的详细信息。此页面还提供了用于下载电子计量库 (E-Metrology Library) 的链接。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月