

优化电能计量中隔离式电流检测的信号链成本和精度

Dr. Ralph Oberhuber

Precision analog-to-digital converters

简介

随着我们持续转向采用太阳能和风能等能源的更加可持续的能源网络，我们更加需要电能计量设备来获取有关各项能耗的详细见解，从而确定需要改进的领域、优化使用和降低成本。需要电能计量子系统的电子终端设备类型包括智能电表、电动汽车 (EV) 充电站、电源和配电单元、智能电器、街道照明和楼宇自动化组件。这些产品的数量之多促使人们需要在电能计量解决方案中尽量降低成本，而美国国家标准协会 C12（美国）或测量仪器指令（欧洲）等地区计量标准则对精度和安全提出严格的要求 [1]、[2]。

图 1 展示电能计量应用中的典型信号链，为简单起见仅展示一个相位。模数转换器 (ADC) 同时测量并数字化每个相位的电压和电流。随后数字信号处理提取计量参数，例如有功和无功功率和能量、线间电压、基本功率和能量以及谐波 [3]。

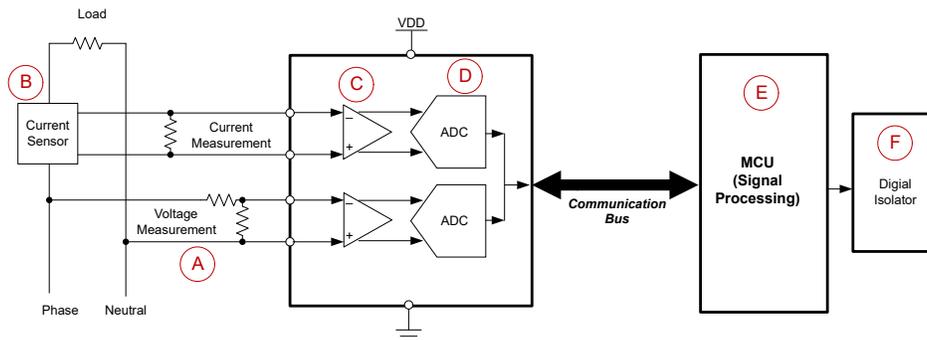


图 1. 电能计量子系统信号链

电能计量中使用的电流传感器元件对比

表 1 总结了电能计量应用中使用的三种电流检测技术的性能优势、挑战以及成本。电流互感器是最受欢迎的传感器，具有动态范围宽、耐用和插入阻抗低（非侵入式电流测量）的特点 [4]。但很可能具有所有电流检测技术中最高的成本。分流电阻器（分流器）具有抗磁性、更小的尺寸和更低的成本，因此非常有吸引力，但热自加热导致缺乏隔离且在较高电流下的精度较低 [5]。

信号链的基本构建模块包括：

- 线电压检测前端（图 1 中 A）。
- 电流测量传感器 (B)。
- 电流传感器与 ADC 之间的前端和信号调节器 (C)。
- ADC (D)。
- 数字信号处理硬件 (E)。
- 电气隔离 (F)。

在大多数情况下，线电压检测前端采用简单的电阻分压器实现 [3]，但其他构建模块存在多种选择。对于每个信号链组件，都需要在性能、尺寸和成本方面进行权衡。本文重点介绍电流测量传感器、信号调节以及 ADC 的性能与成本权衡。

罗氏线圈是其他两种传感器的替代方案且成本最低，特别是在考虑印刷电路板 (PCB) 线圈与整体式罗氏线圈的情况下 [6]。

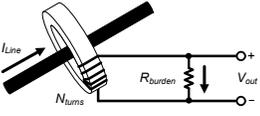
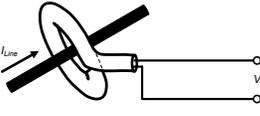
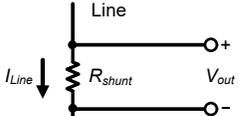
| 传感器类型 | 电流互感器 | 罗氏线圈 | 分流器 |
|-------|---|---|---|
| 方框图 |  |  |  |
| 传递函数 | $V_{out} = \frac{I_{line} R_{burden}}{N_{turns}}$ | $V_{out} \propto \frac{dI_{line}}{dt}$ | $V_{out} = I_{line} R_{shunt}$ |
| 优势 | <ul style="list-style-type: none"> 提供隔离 高线性度 高耐用性 高精度 | <ul style="list-style-type: none"> 提供隔离 无法达到饱和 外形小巧 (PCB) 高线性度 快速响应时间 低损耗 | <ul style="list-style-type: none"> 未隔离 抗磁性 外形小巧 |
| 挑战 | <ul style="list-style-type: none"> 可达到饱和 负载电阻器损耗 需要进行相位校准 尺寸和重量 | <ul style="list-style-type: none"> 需要集成 无法测量直流电 PCB 线圈的灵敏度可能更低 | <ul style="list-style-type: none"> 自加热时电阻可能发生变化 过载信号的可靠性低 |
| 成本 | <ul style="list-style-type: none"> ≥\$0.21 (无屏蔽) ≥\$0.26 (有屏蔽) | <ul style="list-style-type: none"> 某些 PCB 线圈 <\$0.10 整体式线圈 ≥\$0.10 | ≥\$0.10 (锰) |

表 1. 电流传感器对比

PCB 罗氏线圈成本低且安装灵活，对于低成本电能计量应用极具吸引力 [7]、[8]。我们来分析一下基于 PCB 罗氏计量设计的优势和挑战，以及如何优化信号链来尽量降低成本，同时满足地区计量标准。

电能计量中使用的 PCB 罗氏线圈的灵敏度与 ADC 噪声性能

PCB 罗氏线圈灵敏度通常以微伏每安培为单位，取决于几何形状（匝数、线圈尺寸）、磁芯材料（如有）、电流频率以及环境因素（温度、湿度、外部磁场）[9]。常见的灵敏度范围从数十微伏到数百微伏每安培 [9]。

住宅电表测量 250mA 均方根 (RMS) 相电流的常见精度要求为 2% [1]。例如使用 200 μ V/A 罗氏线圈时，该相电流 ADC 输入端信号仅为 200 μ V/A \times 0.250A = 50 μ V。以 2% 的精度测量该信号所需的 ADC 性能（即确定有效分辨率的噪声）低至 0.02 \times 200 μ V/A \times 0.250A = 1 μ V，通过 **方程式 1** 定义：

$$V_{nADC} = tol \times k \times I_{phase-rms} \quad (1)$$

其中， V_{nADC} 是 ADC 所需噪声水平，tol 是给定相电流 $I_{phase-rms}$ （单位为安培）的指定测量精度（以百分比表示），k 是罗氏线圈的灵敏度常数（单位为微伏每安培）。

因此，此示例中 ADC 的总噪声（量化噪声加白噪声）需要低于 1 μ V。

对比 1 μ V ADC 噪声要求与德州仪器 (TI) **ADS131M08** [10] 等精密 ADC 的规格，显然达到预期性能水平可能需要对 ADC 样本进行额外的平均。**表 2** 展示此平均过程，同时还展示过采样率 (OSR) 定义的各种增益设置和数据速率下的总 ADC 噪声（单位为 RMS 微伏）。当增益为 1 且采样率为 4kSPS (OSR = 1,024) 时，ADC 噪声约为 5 μ Vrms。平均时间翻倍时噪声以 $\sqrt{2}$ 的系数提高，因此要满足 ADC 噪声 <1 μ V 的要求，需要时间周期 \geq 16ms。这对于大多数电能计量系统来说可以接受，此类系统通常需要 20ms 的更新速率 [1]。此类平均实际上可以通过结合使用 $\Delta-\Sigma$ ADC 的内部过采样率 (OSR) 功能和外部后平均进行 ADC 内部过采样来实现。

表 2 建议采用的另一种选择是为 ADC 内部的可编程增益放大器 (PGA) 选择更高的增益，以此降低以输入为基准的噪声 [10]。另外，也可以在信号到达 ADC 之前，使用外部增益级对信号进行预处理。但外部增益级会显著增加信号链的成本。

| 平均时间 (ms) | OSR | 数据速率 (kSPS) | 噪声 (μ Vrms), 增益 1 | 噪声 (μ Vrms), 增益 128 |
|-----------|--------|-------------|------------------------|--------------------------|
| 16 | 65,392 | 0.0625 | 0.95 | 0.07 |
| 8 | 32,696 | 0.125 | 1.34 | 0.10 |
| 4 | 16,384 | 0.25 | 1.90 | 0.42 |
| 2 | 8,192 | 0.5 | 2.39 | 0.57 |
| 1 | 4,096 | 1 | 3.38 | 0.77 |
| 0.5 | 2,048 | 2 | 4.25 | 1.00 |
| 0.25 | 1,024 | 4 | 5.35 | 1.20 |
| 0.125 | 512 | 8 | 7.56 | 1.69 |
| 0.0625 | 256 | 16 | 10.68 | 2.40 |

表 2. ADC 噪声性能与速度、平均时间和 OSR。

基于罗氏线圈的电流传感器的 ADC 信号链灵敏度分析

采用低成本 PCB 罗氏电流传感器的系统的主要考虑因素是传感器输出端的信号幅度通常非常小，在大多数情况下仅为几微伏。必须仔细设计信号链，满足计量标准的精度要求。此类极小信号的信号调节必须通过选择具有内部增益的高分辨率 ADC 或在传感器与 ADC 之间级联外部增益级，从而包括显著的差分增益。增加外部增益级通常会产生不利的影响，因为这会增加总成本；因此，量化需要外部增益级的解决方案以及可以避免外部增益级的时机更有意义。

表 3 介绍了三种不同的罗氏线圈，以便分析外部增益级的有效性：

- 线圈 A 是基于采用 PCB 罗氏线圈传感器的高精度交流电流测量参考设计的 PCB 罗氏线圈 [11]，灵敏度约为 20 μ V/A。
- 线圈 B 是另一种专有罗氏线圈，灵敏度约为 100 μ V/A。
- 线圈 C 是市售型整体式罗氏线圈 (Pulse PA3209NL) [12]，灵敏度约为 500 μ V/A。

| 编号 | 线圈类型 | 源极 | 灵敏度 (μ V/A) | 成本 |
|----|------|----------------|------------------|----|
| A | PCB | TI 参考设计 | 20 | 低 |
| B | PCB | 专有 | 100 | 中 |
| C | 批量 | Pulse PA3209NL | 500 | 高 |

表 3. 罗氏线圈在信号链分析中的特性

图 2 展示灵敏度分析的测量设置。各罗氏线圈的输出（如表 3 所示）连接到信号调节接口板，可在其中使用四根跳线选择或绕过基于 TI INA188 的增益级 [13]。增益定义电阻 R_G （参见图 2）为 390Ω，可产生 128 倍的可选外部增益。

仪表放大器 (INA) 接口板的输出连接到使用独立 ADC 的三相电流互感器电表参考设计的第 1 相电流输入 [3]。该参考

设计确实包括负载电阻器 R37 和 R38，这些电阻器仅在连接到电流互感器时才需要使用且在此分析中已物理移除。电表参考设计中的 ADC 为 TI ADS131M08，这是一款高精度、八通道、同步采样 Δ - Σ ADC，具有 1 到 128 倍的内

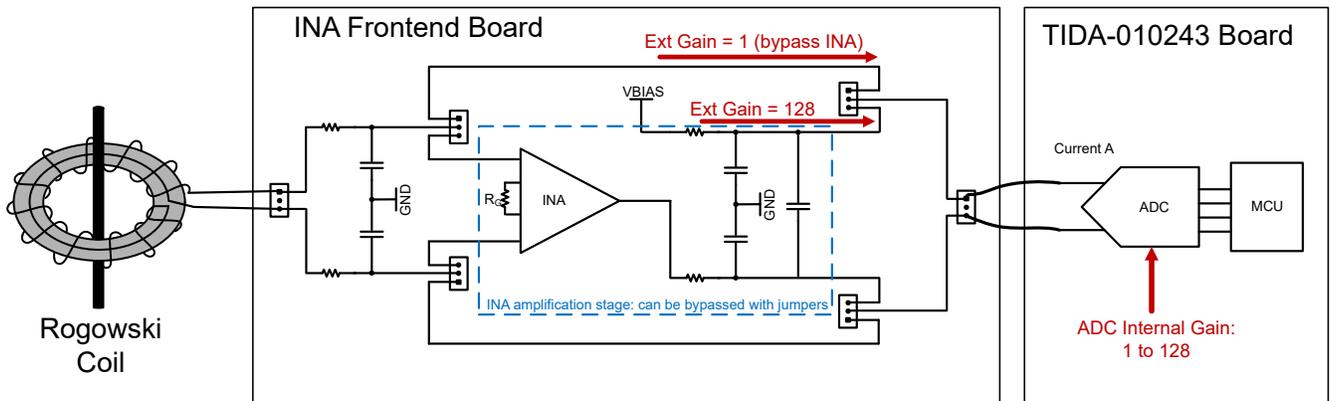


图 2. 信号链分析的测量设置

图 3 和 图 4 展示使用 MTE PTS3.3C 源发生器和参考表测量 100mA 到 10A 的 50Hz 线路电流的电流精度。使用与 [3] 中相同的测试程序，在 20ms 的时间段内对电流和能量的样本取平均值。我们按照 [11] 中概述的程序在数字域中实现罗氏信号积分。另一种方法是如 [14] 所示的模拟主动积分，但我们在分析中忽略此项技术，因为这两种方法通常会产生相似的结果。

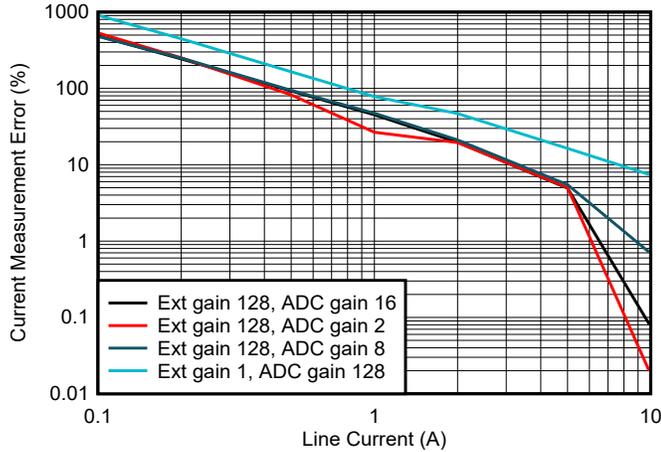


图 3. 不同增益设置下 20µV/A 线圈测量电流精度

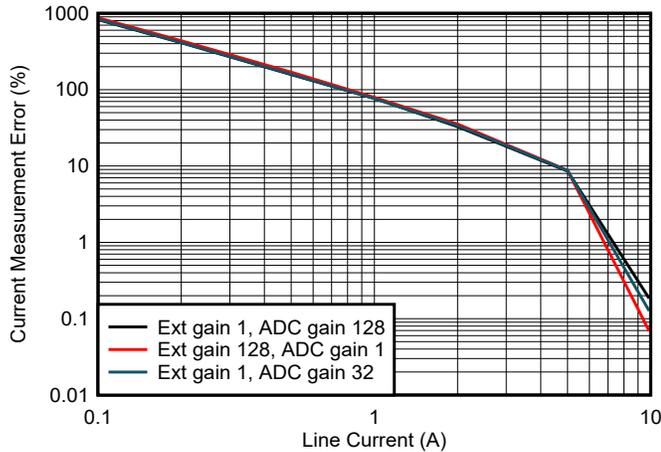


图 4. 不同增益设置下 100µV/A 线圈测量电流精度

对于灵敏度极低的 PCB 线圈（例如 20µV/A），通过级联 INA 级使用 128 倍外部增益可以显著提高精度（参见图 3）。如上文所述，ADS131M08 本身的内部 PGA 增益（即便增益达到 128 倍）无法将较小的输入信号充分提高到量化噪声电平以上。

使用灵敏度 $\geq 100\mu\text{V/A}$ 的 PCB 线圈时（参见图 4），选择内部增益或外部增益会产生类似的误差，表明此时传感

器输出幅度远高于相关相电流范围的量化噪声水平。产生误差的绝对值高于某些收入级电能计量系统可接受的水平，此类系统的精度目标 $\leq 0.5\%$ 。误差增加是在此设置中应用简化校准程序的结果：单点（增益）校准。在典型计量设计中，应用多达三个校准步骤（偏移校准、增益校准和相位校准）可以进一步降低绝对误差。

图 5 和 图 6 展示表 3 中列出的三种不同线圈的测量误差对罗氏线圈灵敏度的依赖性。

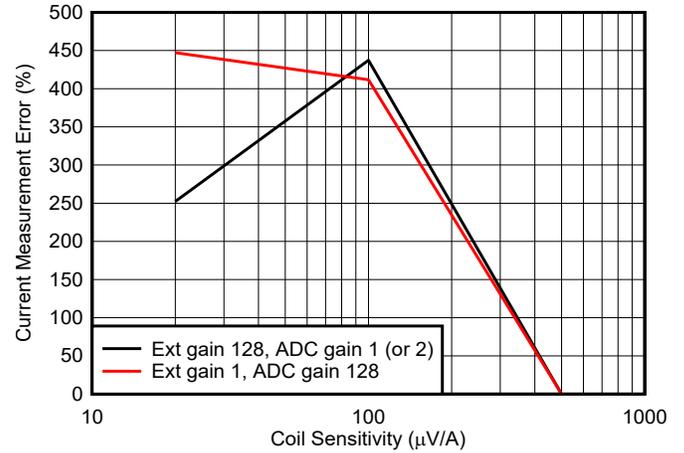


图 5. 三种线圈在 200mA 线路电流下测量电流精度

在较小的相电流 (200mA, 图 5) 和中等相电流 (5A, 图 6) 的情况下，20µV/A 罗氏线圈通过采用外部增益级实现显著改善（误差减小）。检测到较大的线路电流值时 (5A, 图 6)，所有误差均减小到较小的值，符合预期。对于 100µV/A 和 500µV/A 罗氏线圈，应用 128 倍外部增益与使用内部 ADC 增益相比可实现类似的精度。

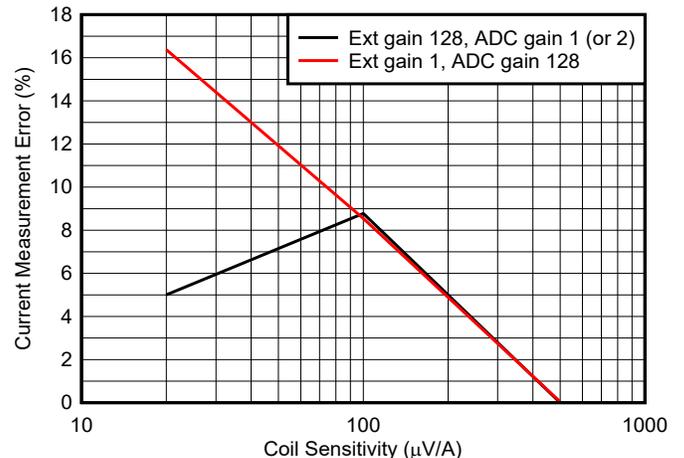


图 6. 三种线圈在 5A 线路电流下测量电流精度

结语

对于 $\geq 100\mu\text{V/A}$ 罗氏线圈，不需要外部增益级，从而降低电能计量信号链解决方案的成本。对于 $< 100\mu\text{V/A}$ 罗氏线圈，使用 TI **ADS131M08** 或类似 ADC 时，可能需要外部增益来满足住宅电能计量精度。另外，也可以考虑使用噪声较低、成本较高的 ADC 来避免额外的电路。

参考资料

1. Kelechava, Brad。 **ANSI C12.20-2015 – 电表 – 0.1、0.2 和 0.5 精度等级**，美国国家标准协会博客，2017 年 5 月 8 日。
2. 欧洲议会和理事会 2004 年 3 月 31 日关于测量仪器的 2004/22/EC 号指令 (<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2004L0022:20130101:en:PDF>)，文档 32004L0022，欧盟：比利时布鲁塞尔，2004 年 3 月 31 日。
3. 德州仪器 (TI) (日期不详) **具有独立 ADC 的三相电流互感器电表参考设计**。德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDA-010243。访问日期：2025 年 3 月 14 日。
4. Blue Jay，日期不详 **电流互感器有哪些优势和劣势？** 访问日期：2025 年 1 月 21 日。
5. Maniar, Krunal。 **比较 HEV/EV 中基于分流器和霍尔传感器的隔离式电流检测解决方案**。德州仪器 (TI) 应用简报，文献编号 SBAA293C，2018 年 6 月。
6. 电气电子工程师学会 (IEEE) 电力系统中继委员会 (PSRC)。 **罗氏线圈在继电器中的实际应用**。IEEE PSRC 专题报告，2010 年 9 月。
7. AIM Dynamics。 **罗氏线圈与电流互感器**。AIM Dynamics 博客文章，2023 年 7 月 24 日。
8. Brooks, Chris。 **为什么选择罗氏线圈？** SETRA 博客文章，2017 年 2 月 13 日。
9. Salomon, Victor。 **基于两相罗氏线圈的电表模拟前端电路**。德州仪器 (TI) 模拟工程师电路，文献编号 SBAA385A，2020 年 7 月。
10. 德州仪器 (TI) (日期不详) **ADS131M08 24 位、32kSPS、8 通道同步采样 Δ - Σ ADC**。访问日期：2025 年 1 月 21 日。
11. 德州仪器 (TI) (日期不详) **采用 PCB 罗氏线圈传感器的高精度交流电流测量参考设计**。德州仪器 (TI) 参考设计编号 TIDA-01063。访问日期：2025 年 3 月 14 日。
12. Pulse Electronics，日期不详 **PA3209NL Sidewinder-电流传感器**。访问日期：2025 年 3 月 19 日
13. 德州仪器 (TI) (日期不详) **INA188 36V、零温漂、轨到轨输出仪表放大器**。访问日期：2025 年 1 月 21 日。
14. 德州仪器 (TI) (日期不详) **适用于继电器和断路器的具有更高精度的罗氏线圈有源积分器参考设计**，德州仪器 (TI) 设计编号 TIDA-00777。访问日期：2025 年 3 月 19 日。

重要声明： 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司