針對能源測量中的隔離式電流感測，將訊號鏈成本與準確度最佳化

Dr. Ralph Oberhuber
Precision analog-to-digital converters

簡介

隨著我們邁向採用太陽能和風能等來源的永續能源電網，能源計量裝置也需要深入了解個別功耗，才能找出需要改善的領域，最佳化使用並降低成本。需要能源計量子系統的電子終端設備類型包括智慧電表、電動車（EV）充電站、電源供應器和配電單元、智慧電器、街道照明和建築自動化元件。這些產品的數量促使人們對能源計量解決方案的最低成本的需求，而地區測量標準，如美國國家標準協會 C12（美國）或測量儀器指令（歐洲），則要求嚴格的準確度和安全性要求 [1]，[2]。

圖 1 說明能源量測應用中的典型訊號鏈，為精簡起見，僅顯示單一相位。類比轉數位轉換器（ADC）會同時測量並數位化各相位的電壓和電流。隨後，數位訊號處理提取有功功率和無功功率和能量，線對線電壓，基本功率和能量以及諧波等計量參數 [3]。

訊號鏈的基礎區塊為：

- 線路電壓感測前端（圖 1 中的 A）。
- 電流測量感測器（B）。
- 電流感測器與 ADC（C）間的前端與訊號調節器。
- ADC（D）。
- 數位訊號處理硬體（E）。
- 電氣隔離（F）。

雖然線路電壓感測前端在多數情況下都是使用簡易的電阻分壓器 [3] 實施，但其他建構區塊也有各種選項可供選擇。這些訊號鏈元件都需在性能、尺寸和成本上做取捨。本文著重於電流量測感測器、訊號調整以及 ADC 的性能與成本取捨。

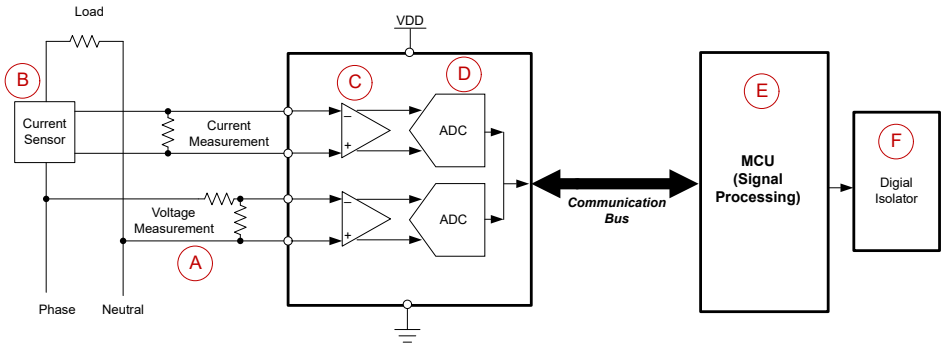


***圖 1.** 能源計量子系統訊號鏈。*

比較用於能源測量的電流感測器元件

表 1 總結了能源計量應用中使用的三種電流感測技術的性能優勢以及挑戰與成本比較。由於電流變壓器的動態範圍廣、耐用性和低插入阻抗（無創電流測量），因此是最受歡迎的感測器抗（非侵入式電流測量）[4]。然而，在所有電流感測技術中，其成本極有可能是最高的。分流電阻器（分流器）極具吸引力，因為其具磁抗擾性、尺寸更小、成本更低，但由於自熱效應，隔離性能較差，電流較大時精度較低 [5]。

羅氏線圈是其他兩個感測器的有趣替代方案，並且是成本最低的選擇，特別是在考慮印刷電路板（PCB）線圈與大量羅氏線圈時 [6]。

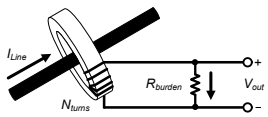
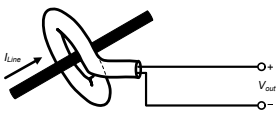
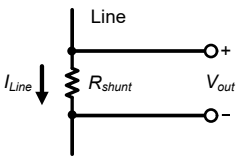
感測器類型	電流變壓器	羅氏線圈	分流
方塊圖			
傳輸功能	$V_{out} = \frac{I_{line} R_{burden}}{N_{turns}}$	$V_{out} \propto \frac{dI_{line}}{dt}$	$V_{out} = I_{line} R_{shunt}$
優點	• 提供隔離 • 高線性 • 高耐用性 • 高準確度	• 提供隔離 • 無法飽和 • 精巧外型尺寸（PCB）。 • 高線性 • 快速回應時間 • 低功率損失	• 非隔離式 • 抗磁 • 尺寸精巧
挑戰	• 飽和 • 負載電阻器功率損失 • 需要進行相位校準 • 尺寸和重量	• 需要集成 • 無法測量 DC • PCB 線圈的靈敏度可能較低	• 自熱時電阻可能不同 • 過載訊號可靠性較低
成本	≥ 0.21 美元（無屏蔽） ≥ 0.26 美元（含屏蔽）	部分 PCB 線圈 < 0.10 美元 ≥ 大量線圈 0.10 美元	≥ 0.10 美元（錳）

***表 1.** 電流感測器比較。*

由於 PCB 羅氏線圈的安裝成本低且彈性佳，因此對低成本的能源計量應用極具吸引力 [7] ， [8]。現在讓我們來分析 PCB 羅氏測量設計的優點與挑戰，以及如何將訊號鏈最佳化，以達到最低成本，同時符合區域性量測標準。

能源量測中使用的 PCB 羅技線圈靈敏度與 ADC 雜訊性能

PCB 羅式線圈靈敏度通常以每安培微伏特為單位，並取決於幾何形狀（圈數，線圈尺寸）、核心材料（如果有）、電流頻率和環境因素（溫度，濕度，外部磁場）[9]。常見的靈敏度範圍從每安培數十到幾百微伏特 [9]。

家用電錶的常見精度要求是測量 250mA 均方根 （RMS）相電流，精度為 2% [1]。例如，對於 200µV/A 的羅氏線圈，對於該相電流，ADC 輸入端的訊號僅為 200µV/A×0.250A=50µV。以 2% 的精度測量該訊號所需的 ADC 性能（即決定有效解析度的雜訊）低至 0.02 × 200µV/A × 0.250A = 1µV，如 **方程式 1** 所定義：

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

其中 V_{nADC} 為所需的 ADC 雜訊位準， TOL 為指定相位電流的指定量測精度（以百分比表示），$I_{相位\ rms}$ （以安培為單位），而 k 則是羅式線圈的靈敏度常數（以微伏特 / 安培為單位）。

因此，在這個例子中，ADC 的總雜訊（量化雜訊加上白雜訊）需要低於 1µV。

將 1µV ADC 雜訊需求與德州儀器（TI）**ADS131M08**[10] 等精密 ADC 的規格進行比較，很明顯，達到預期的性能水準可能需要對 ADC 樣本進行額外的平均值。**表 2** 說明此平均結果，並顯示由過取樣率（OSR）定義的各種增益設定和資料速率，以 RMS 微伏特為單位的總 ADC 雜訊。增益為 1 且取樣率為 4kSPS （OSR = 1,024）時， ADC 雜訊約為 5µVrms µV。由於雜訊以 $\sqrt{2}$ 的因數改善以使平均時間加倍，因此若要滿足 ADC 雜訊的 <1µV 要求，就需要 ≥16ms 的時間段。大多數能量計量系統都可以接受，通常需要 20ms 的更新速率 [1]。這種平均類型可通過結合使用 delta-sigma ADC 內部超取樣率 （OSR ） 功能和外部後平均來實施 ADC 內部超取樣。

表 2 另一個建議的選項是為 ADC 內部的可編程增益放大器（PGA）選擇更高的增益，因為它會降低參考輸入的雜訊 [10]。或者，您也可在訊號到達 ADC 前，以外部增益級做為訊號先決條件。但外部增益級會大幅增加訊號鏈的成本。

平均時間（ms）	OSR	資料速率（kSPS）	雜訊（µVrms µV），增益 1	雜訊（µVrms µV），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 雜訊性能與速度，平均時間和 OSR 的比較。*

羅氏線圈架構電流感測器 ADC 訊號鏈靈敏度分析

使用低成本 PCB 羅氏電流感測器的系統主要問題是感測器輸出處的訊號振幅通常非常小，在大多數情況下只有幾微伏特。您必須仔細設計訊號鏈，以滿足量測標準驅動的精確度需求。如此微小訊號的訊號調節必須包含顯著的差動增益，方法是選擇具內部增益的高解析度 ADC ，或是串接感測器與 ADC 之間的外部增益級。增加外部增益級通常是有害的，因為會增加總成本；因此，量化哪些解決方案需要外部增益級，以及何時可以避免，會更為合理。

表 3 介紹三種不同的羅氏線圈，以分析外部增益級的有效性：

- 線圈 A 是一個 PCB 羅氏線圈，基於使用 PCB 羅氏線圈感測器的高精度交流電流測量參考設計 [11]，靈敏度約為 20µV/A。
- 線圈 B 是另一種專利的羅氏線圈，靈敏度約為 100µV/A
- 線圈 C 是市售的體磁羅氏線圈（脈衝 PA3209NL）[12] ，靈敏度約 500µV/A。

號碼	線圈類型	來源	靈敏度（µV/A）	成本
A	PCB	TI 參考設計	20	低等
B	PCB	私有資訊	100	中
C	大量	脈衝 PA3209NL	500	高等

***表 3.** 羅氏 x 線圈在訊號鏈分析期間的進行歸類。*

圖 2 說明靈敏度分析的測量設定。各獨立羅氏線圈的輸出（如所示**表 3**）連接至訊號調節介面板，您可在此選擇或以四個跨接器繞過 TI INA188 型增益級 [13]。增益定義電阻器 R_G（請參閱**圖 2**）為 390Ω Ω ，提供可選的外部增益 128。

儀器放大器（INA）介面板的輸出可連接具備獨立 ADC 的三相電流變壓器 E 電表參考設計的相位 1 電流輸入[3]。此參考設計確實包含負載電阻器 R37 和 R38 ，僅在連接至比流器時才需要，且已實際移除以進行分析。電子電錶參考設計中的 ADC 是 TI **ADS131M08**，這是一種高精度、八通道、同時取樣 delta-sigma ADC，內部增益選項範圍為 1 至 128。

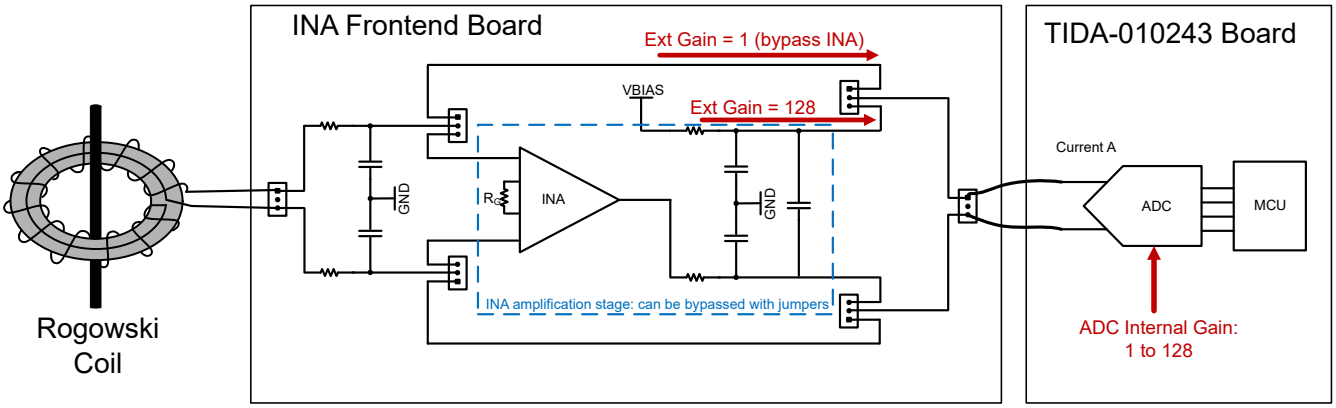


***圖 2.** 訊號鏈分析的測量設定。*

圖 3 和**圖 4** 表示使用 MTE 的 PTS3.3C 源產生器和參考儀表測量的 50Hz 線電流（100mA 至 10A）的電流精度。使用與 [3] 相同的測試程序，在 20ms 時間段內平均電流和能量的樣本。我們按照 [11] 中概述的步驟在數位域中實施羅式訊號集成。另一種方法是類比主動集成，如 [14] 所示，但在我們的分析中忽略此技術，因為這兩種方法通常產生相似的結果。

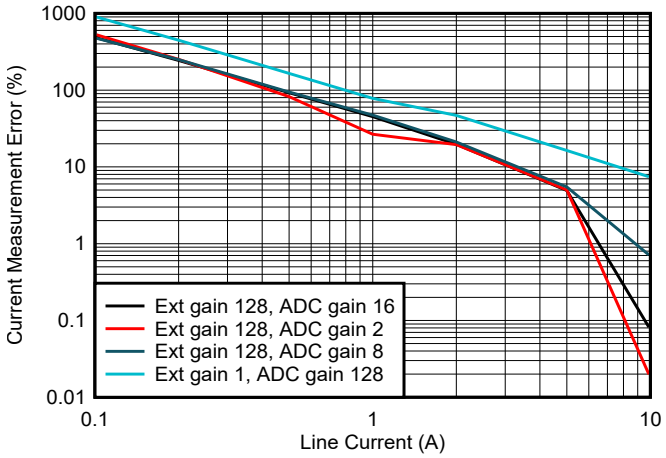


***圖 3.** 使用不同增益設定測量 20µV/A 線圈的電流精度。*

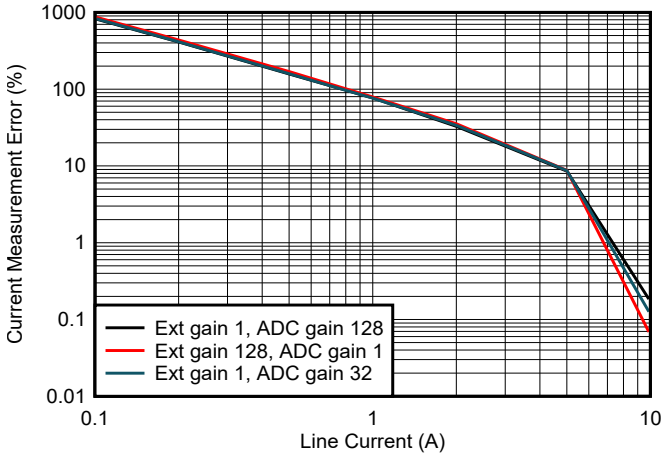


***圖 4.** 使用不同增益設定測量 100µV/A 線圈的電流精度。*

對於靈敏度極低（例如， 20µV/A）*的* PCB 線圈，通過級聯 INA 級使用 128 外部增益時會有顯著改善（請參閱**圖 3**）。如先前所述，僅 ADS131M08 的內部 PGA 增益（即使增益為 128）並無法將小輸入訊號提升至高於量化雜訊位準以上。

使用靈敏度為 ≥100µV/A 的 PCB 線圈 （請參閱**圖 4**）時，選擇內部增益與外部增益會產生類似的誤差，表示感測器輸出振幅現在遠高於相關相位電流範圍的量化雜訊水平。產生誤差的絕對值高於某些收入級能源計量系統的可接受程度，該系統的目標是準確度 ≤0.5%。誤差增加是此設定中應用簡化校準程序的結果：單點（增益）校準。在典型的量測設計中，最多可套用三個校準步驟（偏移校準，增益校準和相位校準），以進一步減少絕對誤差。

圖 5 和**圖 6** 說明了 **表 3** 中列出的三種不同線圈的測量誤差對羅式線圈靈敏度的依賴性

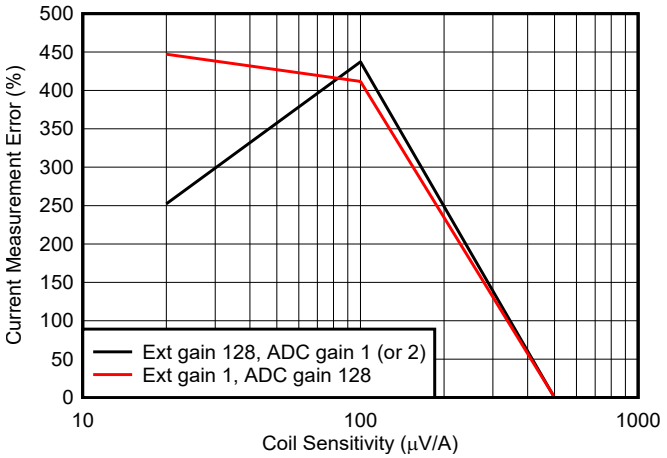


***圖 5.** 三個線圈在 200mA 線路電流下的測量電流準確度。*

在小相位電流（200mA ，**圖 5**）與中級相位電流（5A ，**圖 6**）的情況下， 20µV 羅式線圈採用外部增益級可大幅改善（較小誤差）。正如預期的那樣，當檢測較大的線路電流值（5A，**圖 6**）時，所有誤差都會縮至較小的值。對 100µV/A 和 500µV/A Rogowski 而言，套用 128 外部增益與使用內部 ADC 增益的結果可獲得不相上下的準確度。

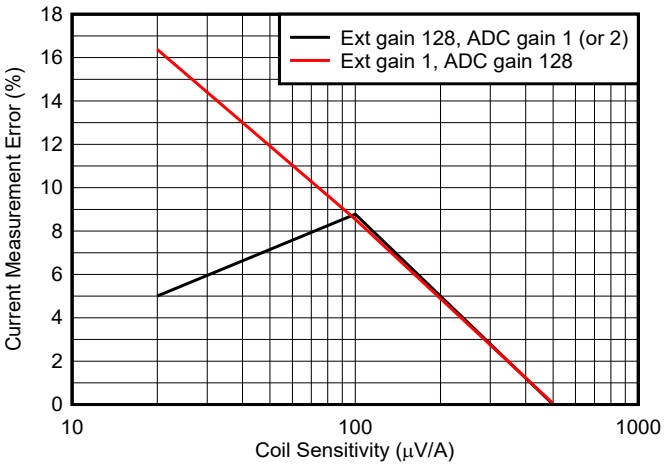


***圖 6.** 三個線圈在 5A 線路電流下的測量電流準確度。*

結論

≥100µV/A 羅式線圈而言，外部增益級不是必須的，因此可降低能源量測訊號鏈解決方案的成本。就 ADC/A Rogowski 線圈而言，在使用 TI **ADS131M08** 或同等 <100µV 時，可能需要外部增益來滿足家用電錶的準確度。或者，也可考慮使用低雜訊、高成本的 ADC 來避免增加電路。

參考資料

1. Kelechava, Brad。**ANSI C12.20-2015 – 電錶– 0.1、0.2 和 0.5 精度等級**。美國國家標準協會部落格，2017 年 5 月 8 日。
2. 歐洲議會和理事會 2004 年 3 月 31 日關於測量儀器的第 2004/22/EC 號指令 （**https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2004L0022:20130101:en:PDF**）。32004L0022 號文件。歐盟：比利時布魯塞爾。2004 年 3 月 31 日。
3. Texas Instruments. n.d.**具備獨立 ADC 的三相比流器電表參考設計**。德州儀器參考設計編號 TIDA-010243。存取日期：2025 年 3 月 14 日。
4. Blue Jay. N.D.**變壓器的優缺點是什麼**？2025 年 1 月 21 日存取。
5. Maniar, Krunal。**HEV/EV 中基於分流器和霍爾的隔離式電流感應解決方案比較**。德州儀器應用簡介，文獻編號 SBAA293C，2018 年 6 月。
6. 電氣和電子工程師協會 （IEEE） 電源系統中繼委員會 （PSRC）。**羅式線圈應用與中繼的實用層面**。IEEE PSRC 特別報告， 2010 年 9 月。
7. AIM Dynamics。**羅式線圈與電流變壓器**。AIM Dynamics 部落格文章， 2023 年 7 月 24 日。
8. Brooks, Chris。**爲什麼選擇羅式線圈**? Setra 部落格文章， 2017 年 2 月 13 日。
9. Salomon, Victor。**雙相羅式線圈架構電錶類比前端電路**。德州儀器模擬工程師電路，文獻編號 SBAA385A，2020 年 7 月。
10. Texas Instruments. n.d.**ADS131M08 24 位元、32 kSPS、8 通道、同步取樣、Δ-Σ ADC**。2025 年 1 月 21 日存取。
11. Texas Instruments. n.d.**採用 PCB 羅式線圈感測器的高準確度 AC 電流量測參考設計**。德州儀器參考設計編號 TIDA-01063。存取日期：2025 年 3 月 14 日。
12. Pulse Electronics. N.D.**PA3209NL** 側繞線器電流感測器。存取日期：2025 年 3 月 19 日
13. Texas Instruments. n.d.**INA188 36V、零漂移、軌到軌輸出儀表放大器**。2025 年 1 月 21 日存取。
14. Texas Instruments. n.d.**適用於繼電器和斷路器且具有更高準確度的羅式線圈主動式積分器參考設計**，德州儀器參考設計編號 TIDA-00777。存取日期：2025 年 3 月 19 日。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2025 Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES “AS IS” AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI’s products are provided subject to TI’s Terms of Sale or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI’s provision of these resources does not expand or otherwise alter TI’s applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated