

Application Brief

在电子计量中切换到罗氏线圈的优势



Daniel Maaya

简介

设计可靠的电表的第一步是选择合适的电流传感器。电流互感器 (CT)、分流电阻器和罗氏线圈是现代电表常用的三种选项，但其中的每一种都存在局限性，包括温度变化、绝缘和隔离要求以及篡改易感性。如果这些缺点得不到适当解决，可能会导致严重后果，例如电能测量不准确和公用事业公司蒙受财务损失。

本应用手册旨在让电表设计人员对这些电流检测技术进行明确的比较。本文概述了每种传感器类型的优缺点，解释了这些缺点如何影响系统性能，并最终帮助设计人员为电表架构选择更优的电流检测解决方案。

每种电流传感器的设计局限性

电流互感器 (CT)

电流互感器 (CT) 可在宽电流和温度范围内提供高精度、出色的线性度和可靠的性能，因此是精密计量应用的理想选择。它们提供电隔离以保护电子元件，并具有低功率损耗。然而，尽管精度高，CT 存在一些设计和运行限制，因此在现代计量系统中不太受欢迎。这些限制包括高成本、篡改、尺寸和重量以及制造局限性。

篡改和可靠性问题：

CT 面临的最大的挑战之一是篡改。这个问题是电表制造商、供应商以及公用事业公司需要关注的主要问题，因为任何影响计费准确性的行为都可能导致远高于电表本身成本的财务损失。篡改通常是由磁芯的物理局限性导致。例如，只需在传感器附近放置磁体、向输入端子施加高压脉冲或将中性线接地，即可使 CT 饱和，其中每一种方式都可能使测量精度失真或完全禁用器件，从而导致计费不准确。

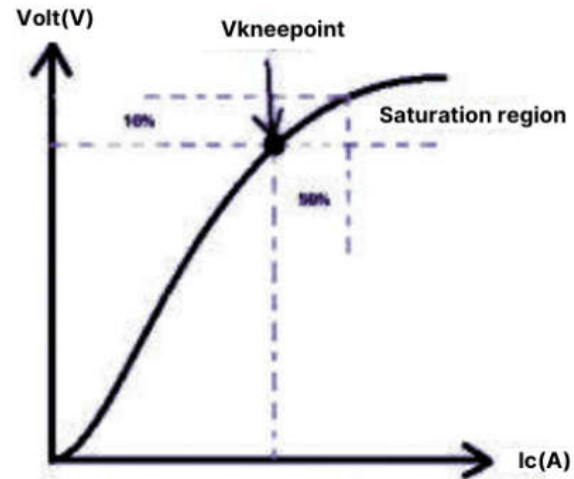


图 1. 电流互感器因过流而出现饱和

成本和制造限制：

CT 的成本是促使使用者寻找替代电流检测技术的另一个关键因素。由于住宅和商业能源表的产量高，并且预计需要持续使用大约十年，因此成本效益至关重要。

CT 制造商通常只能以更低的成本提供标准尺寸，而自定义 CT 的成本要高得多。这种灵活性的欠缺可能会限制仪表设计人员的工作，从而强制进行设计折衷，导致无法遵守客户要求或公用事业规范。此类限制不仅会给制造商和供应商带来潜在的产品损失，还会浪费宝贵的工程开发时间。

尺寸和重量：

虽然基于 CT 的完整仪表起初似乎具有成本效益，但电流互感器的物理特性（特别是尺寸和重量）可能会带来重大的物流挑战。CT 体积庞大，增加了运输复杂性和运输费用，尤其是在需要大量分布时。在某些情况下，运输、搬运和包装的总成本会提高每件商品的整体价格，从而抵消初始成本优势。这一增加的费用可能会使基于 CT 的仪表在市场上缺乏竞争力，可能导致主要供应商或制造商在无法胜过提供更轻、更紧凑且更易于发货的仪表的竞争对手。

分流电阻器

具有成本效益的仪表通常使用分流电阻器进行电流检测，因为其工作原理简单、成本低且外形紧凑。分流电阻器可在宽电流电平范围内提供出色的线性度、快速响应和稳定的性能。基于分流器的感应功能可在没有磁性元件的情况下进行精确测量，从而消除磁传感器中常见的饱和和迟滞等问题。然而，尽管简单且精确，分流电阻器仍带来了几个挑战，使得在某些计量系统中的使用受到限制。这些限制包括缺少电气隔离、大电流下的功率耗散增加、温漂，以及高压环境中的潜在故障。

缺乏电气隔离：

分流电阻器的主要缺点之一是测量电路和高压线路之间没有电气隔离。与电流互感器 (CT) 不同的是，CT 本身可提供电隔离，而分流器直接连接到电流路径，使测量系统暴露在线路电压下。这种隔离缺失会导致设备损坏的风险，尤其是在高压下或三相系统中。它还需要隔离式 ADC 等额外的隔离电路，这增加了设计复杂性、成本和空间占用，抵消了作为分流器优势的简单性。

高电流和温漂下的功率耗散：

当电流流经分流电阻器时，功率会在 $P = (I^2) R$ 后以热量的形式耗散。在高电流水平下，即使是很小的电阻值也会导致产生大量热量。这种热量不仅会降低效率，还会导致电阻器温度上升从而影响性能和长期可靠性。随着电阻器温度的变化，电阻值会略有变化，从而引入测量误差。在热波动较大的户外或工业环境中，如果应用无法进行充分散热，则分流电阻在超出极低电流（低至四分之一额定电流）的情况下将无法运行。温度漂移会随着时间的推移导致累积的电测量误差，因此分流电阻器不适合必须符合 0.1 级或更高精度标准的精密计量应用。

额定值更高的电阻器或热管理设计（散热器和风扇）使得该设计更加庞大，对于紧凑的能量敏感型计量系统而言效率较低。

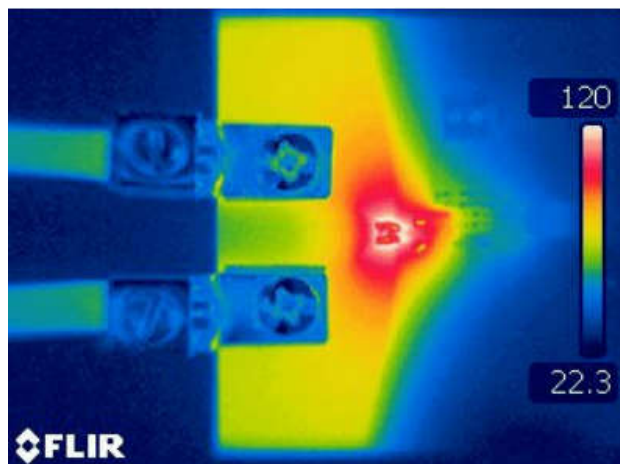


图 2. 50A 时分流电阻器热行为

高压系统中的故障：

在高压计量应用中，分流电阻器会带来保护风险，因为它们必须同时处理大电流和高电势差。短路或浪涌等故障会导致灾难性故障、损坏附近的电路或危害用户。确保足够的爬电距离、间隙和绝缘会提高 PCB 的复杂性和成本。因此，虽然分流电阻器非常适合低压或直流计量，但对于隔离和故障保护至关重要的高压交流系统，其实用性和安全性都会降低。

罗氏线圈

罗氏线圈用于现代计量系统，在这类系统中，尺寸、灵活性、可定制性和在高电压、高电流和宽频率范围等极端条件下的性能至关重要。由于没有磁芯，罗氏线圈更适合用于篡改可能导致公用事业公司蒙受财务损失的应用。由于没有铁磁芯，罗氏线圈本身就不受磁饱和及迟滞的影响，即使在存在大电流瞬态、失真波形或叠加信号的情况下，其一致的性能也能通过考验。

罗氏线圈的主要优势之一是其设计和外形具有灵活性。它们可以制造成各种尺寸和几何形状，以安装在导体或汇流条周围，最值得注意的是，它们可以使用印刷电路板 (PCB) 进行制造。PCB 罗氏线圈具有多种优势：重量轻、具有成本效益且高度可定制，适用于紧凑型计量设计。与传统 CT、分流器和霍尔效应传感器均不同。

罗氏线圈是一种 di/dt 传感器，这意味着它能测量电流随时间变化的速率，并输出与该变化成正比的电压。因此，线圈的输出与实际电流波形具有 90 度的相位差。为了获得准确的电流表示，信号通过积分器电路，积分器电路会重建原始电流波形以进行测量和分析，这可以通过外部应用放大器（运算放大器）或使用软件集成算法来完成。

罗氏线圈的另一项主要优势是固有的电气隔离。由于不会与导体进行物理接触，因此它们会将计量电子器件与高压线路隔离，从而防止出现电压尖峰、浪涌和瞬态脉冲。此外，PCB 罗氏线圈可以采用差分布线方式，可提供出色的共模噪声抑制，并使传感器不受电磁干扰 (EMI) 的影响。此外，由于缺少磁性材料，因此不会出现磁芯温度漂移，从而保证在宽温度范围内的稳定精度。

虽然罗氏线圈具有许多优势，但它们也带来了一些设计挑战，必须加以管控，使其成为电表电流检测的理想选择。具体而言，外部信号调节的需求因应用的电流范围、频率和精度要求而异。

对于低电流或高精度计量应用，需要由放大和集成级组成的外部信号调节电路来准确地重建电流波形。然而，在高频或高振幅环境（例如电能质量监测或工业计量）中，线圈的固有频率相关灵敏度随频率增加（线性关系），从而产生足够大的输出电压，可以直接测量（通常在毫伏范围内），而无需额外的电路。

当需要信号调节电路时，添加精密仪表放大器（例如 INA828、INA333、INA826 和 INA823）、TLV9001 等有源集成器、电源和无源器件不可避免地会增加物料清单 (BOM) 和整体系统成本。但是，在高精度、稳定性和计费精度是关键性能要求的应用中，这种复杂性的提高可以接受。在这种情况下，与传统电流传感器和分流电阻器相比，精心设计的基于罗氏线圈的检测系统仍然可以提供设计灵活性、隔离能力和长期可靠性。

由于罗氏线圈是电磁传感器，因此它们围绕载流导体的方向在保持信号完整性和整体系统稳定性方面起着至关重要的作用。当用于特定方向的线圈校准仪表时，线圈的任何后续移动或位移都会改变磁耦合。因此，必须重新校准仪表以验证测量是否准确。不过，这可能会给仪表制造商和供应商带来问题。然而，大多数仪表设计人员的目标是实现紧凑的设计，使 PCB 罗氏线圈紧密地缠绕在导线周围，在这种情况下，任何方向变化都可以忽略不计，这有助于实现完整解决方案的整体紧凑性，同时保持信号的可靠性和信号完整性。

一些人可能会担心，罗氏线圈的信号调节电路具有大量的元件，这可能会影响在能量表的典型 10 年寿命内保持精度的能力。这正好体现了校准的重要性。每个电表都必须在发货前进行工厂校准，在某些情况下（例如 ANSI C12.1 (2024) 规定的情况），电表也会在安装时进行现场校准，以验证是否符合精度标准。正确校准基于罗氏线圈的仪表后，电压、电流或功率测量的任何变化都会得到有效补偿。因此，该系统可保持长期测量稳定性和精度，从而在仪表的整个使用寿命期间发挥可靠的计费准确性。

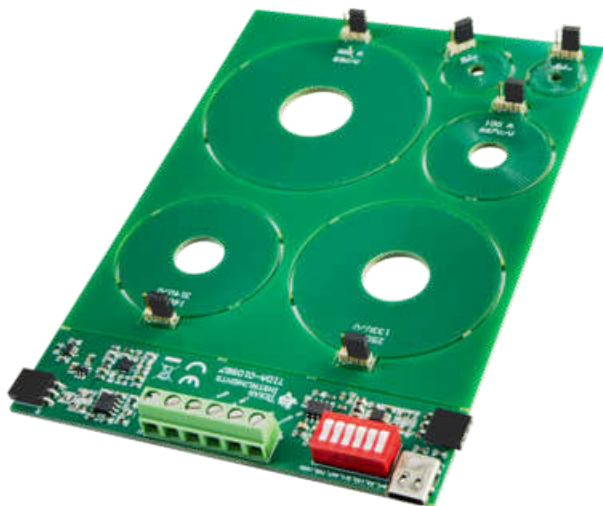


图 3. TIDA-010987 PCB 罗氏线圈电流传感器



图 4. TIDA-010986 电子计量罗氏线圈信号调节电路

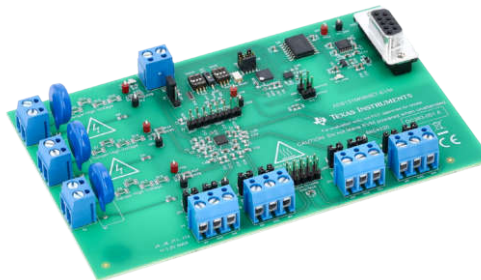


图 5. ADS131M08MET-EVM

结语

电能计量电流检测技术的发展表明，PCB 罗氏线圈是现代电表设计的下一个主要趋势。与电流互感器 (CT)、分流电阻器和霍尔效应传感器等传统传感器相比，PCB 罗氏线圈在精度、隔离、灵活性和可制造性之间实现了出色的平衡。

通过利用无芯差分绕组结构，罗氏线圈消除了磁饱和、迟滞和篡改敏感性等问题，从而确保在宽电流范围内的稳定和线性性能。PCB 实施方案通过提供轻量级、低成本和高度可重复的制造和校准过程，进一步增强了这些优势，从而能够集成到紧凑的高密度仪表设计中。

尽管罗氏线圈可能需要信号调节和校准，尤其是在低电流和高精度应用中，但该技术的优势掩盖了这些不足之处。根据 ANSI C12.1 (2024) 等标准的要求进行适当的校准，可确保有效补偿任何测量漂移或元件变化，从而在电表的使用寿命内保持计费级精度。

最终，向 PCB 罗氏线圈的转变将为计量制造商和公用事业提供商提供通往更智能、更小巧、制造商数量不限

且仪表弹性更高的道路。凭借其可扩展性、抗篡改能力、设计灵活性和长期稳定性，这些器件不仅可作为下一代电能计量系统以及许多其他应用的替代方案，而且还是战略改进。

[ADS131M08MET-REF](#)、[TIDA-010986](#) 和 [TIDA-010987](#) 是 TI 最新的参考设计，主要用于在收入级仪表中使用 PCB 罗氏线圈，根据 ANSI 和 IEC 标准进行了测试，能够实现 0.1 级精度，旨在解决电子计量中 PCB 罗氏线圈的所有局限性。

表 1. 电流传感器对比

规格	电流互感器	分流电阻	PCB 罗氏线圈
直流敏感型	以直流饱和	测量直流	不测量直流
防篡改	易于篡改	易于篡改	难以篡改
温漂	轻微影响 (依赖核心)	受影响	不受影响
隔离	电隔离	需要隔离 (数字或模拟)	电磁隔离
外部电路	负载电阻器	无需外部电路	某些应用需要精密放大器和集成器
电流范围	A - kA	mA - A	mA - kA
频率带宽	受限 (50/60Hz 至若干 kHz)	高达 kHz	高达 MHz
尺寸	体积大	中	可定制

表 2. TI 参考设计选择

相位数	基于 CT	基于罗氏线圈	基于采
1 (单相)	ADS131M08MET-REF / TIDA-010243	TIDA-010986 / TIDA-010987	TIDA-010940 / AMC-ADC-1PH-EVM
拆分	x	x	TIDA-010944
3 (多相)	ADS131M08MET-REF / TIDA-010243	TIDA-010986	TIDA-010244

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