

Application Note

适用于低压无人机、机器人和伺服驱动器的精密电流检测



Elia Hanna, Martin Staebler, Isolated Converters

摘要

本应用手册针对由 24V 至 100V 直流总线电压供电的三相电机控制逆变器，比较了两种基于分流器的同相电流检测设计：[AMC0106M05](#) 和 [AMC0106M25](#) 功能型隔离式 Δ - Σ 调制器，以及具有增强型 PWM 抑制能力的 [INA241A](#) 非隔离式电流检测放大器。[AMC0106M05](#) 支持 $\pm 50\text{mV}$ 线性输入范围，[AMC0106M25](#) 支持 $\pm 250\text{mV}$ 线性输入范围；[INA241A](#) 则在 -5V 至 110V 的共模输入范围内运行。典型应用包括由低于 60V 的电源供电的电池驱动无人机、伺服驱动器以及协作或人形机器人。两款器件均在整个工业温度范围内实现了低于 1% 的测量精度，满足精密电机控制的要求。

文中围绕分辨率、防噪性能、传播延迟以及 MCU 接口需求等维度，分析了两类架构之间的主要取舍。[AMC0106Mxx](#) 双接地端架构被证实具有固有的 PWM 防噪性能，无需消隐期；通过 Sinc3 滤波器在 $\text{OSR}32 - 128$ 下过采样可实现大于 12 位 ENOB，代价是需要一路专用高侧电源以及具备 Σ - Δ 滤波器通道的 MCU。[INA241A](#) 则被证实可利用开关电容器 PWM 抑制滤波器，在 1MHz 带宽下实现 9 至 11 位 ENOB，传播延迟仅为 $0.25\mu\text{s}$ ，且只需外部 ADC 和电压基准。两种设计的总尺寸均很小，使其成为空间受限型电机控制设计的理想选择。

内容

1 系统简介.....	2
2 直列式电流检测器件选项.....	4
2.1 共模电压与工作电压的关系.....	4
2.2 器件架构比较.....	5
2.3 性能优势分析.....	6
3 总结.....	8
4 参考资料.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 系统简介

在通常工作于 24V 至 100V 直流总线电压的低压电机控制应用中，精密电流检测面临诸多独特的设计挑战，需要仔细考量哪种电流检测器件对系统最实用。本应用手册重点讨论基于分流器的同相电流检测设计。与通过低侧分流器间接检测电机电流相比，同相电流检测具有显著的系统优势。由于可连续测量电机相电流，同相检测通过过采样实现了更精确、噪声更低的电流检测，尤其是在 PWM 占空比较小的情况下。同相检测还允许 PID 电流控制器在每个 PWM 周期运行两次，以获得更高的电流环路带宽，从而实现更快的转矩响应。此外，同相检测能够实现快速的相间和相对 GND 短路检测，使系统更加稳健。同相检测的另一个系统优势在于，低侧 Si-FET 或 GaN-FET 的源极直接连接到系统接地端。与基于低侧分流器的设计相比，没有额外的寄生阻抗，有助于减少 PWM 开关期间的开关节点振铃。

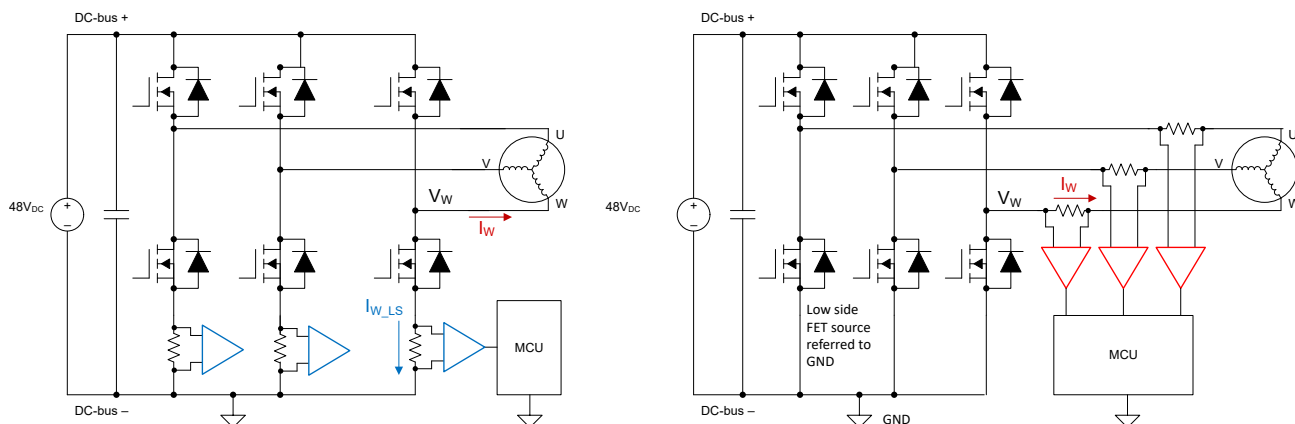


图 1-1. 三相电机电流检测架构：基于低侧分流器（左侧）和基于同相分流器（右侧）

低侧分流器检测相对于系统 GND 的共模电压近乎为零，而同相电流检测器件则工作于由直流总线决定的 PWM 开关共模电压下。此外，同相电流检测器件需要具有高抗扰度（CMTI、PWM 抑制），以应对压摆率达 10V/ns 或更高的共模电压瞬变，以及高于直流总线的过冲和低于系统接地端的下冲，从而即使在 PWM 开关期间也能精确测量相电流，如图 1-2 所示（其中直流总线电压为 48V）。

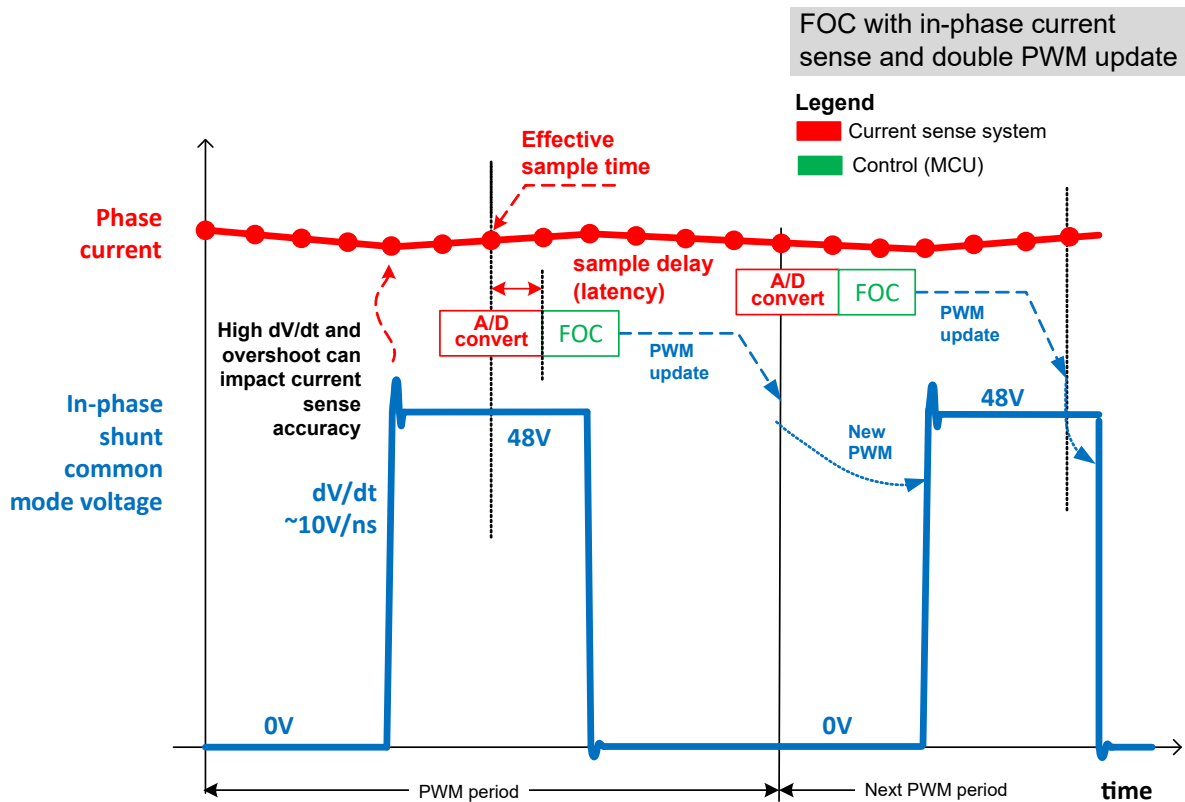


图 1-2. 采用双 PWM 更新时，一个 PWM 周期内的同相分流器共模交流电压

2 直列式电流检测器件选项

对于基于分流器的系统，可使用能够承受高共模电压和高共模电压瞬变的隔离式和非隔离式电流检测器件。

选择隔离式还是非隔离式电流检测架构，需要在精度、有效分辨率与信噪比、传播延迟、系统级防噪性能、与微控制器的模拟或数字接口等之间进行权衡。

我们来深入了解 TI 最新的电隔离式调制器 AMC0106M05 和 AMC0106M25，以及具有增强型 PWM 抑制能力的非隔离式 INA241A 双向超精密电流检测放大器。两款器件均能够满足精密电机控制应用所要求的优于 1% 的精度需求，例如电池供电的低压无人机，以及 24V 至 60V 的机器人和伺服驱动器。

2.1 共模电压与工作电压的关系

要真正理解功能型隔离式器件与非隔离式器件的功能及要求，必须先消化这些器件的相关规格，并厘清器件工作范围标示方式的差异。无论采用隔离式器件还是非隔离式器件，术语可能有所不同，但应用场景和含义保持不变。

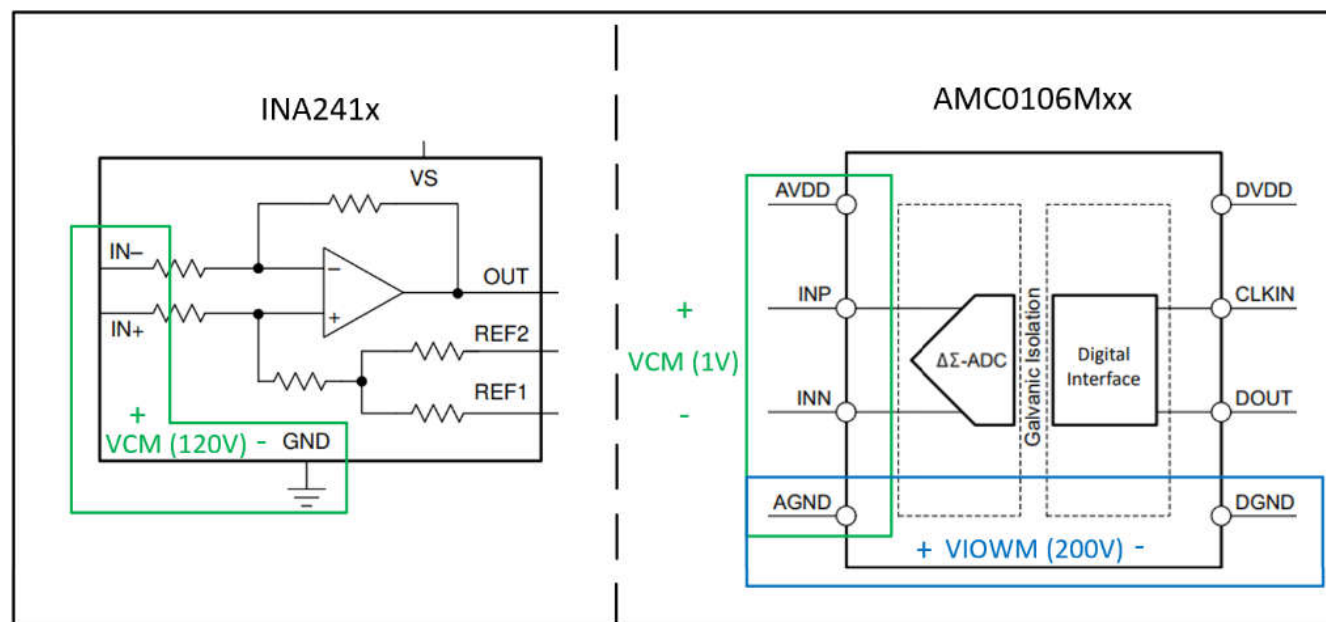


图 2-1. 隔离式和非隔离式系统中 VCM 与 VIOWM 的关系

对于非隔离式器件，图 2-1 突出显示了共模输入电压如何描述相对于系统接地端的允许输入引脚电压。该规格决定了在不影响器件性能的前提下可施加的共模电压范围。对于 INA241，为了获得最佳性能，推荐范围为 -5V 至 110V，-20V 至 120V 为其绝对最大工作范围，但性能会有所下降。

像电容隔离型 AMC0106M05 ($\pm 50\text{mV}$ 线性输入范围) 和 AMC0106M25 ($\pm 250\text{mV}$ 线性输入范围) 这类隔离式设计，通常使用工作电压规格来界定在隔离栅退化和器件失效前器件的工作范围，如图 2-1 所示。工作电压规定了器件上两个完全隔离的接地端 AGND 和 DGND 之间所允许的电压差。AMC0106 在这两个接地端之间的最大工作电压为 200Vrms 或 280Vdc，用于承受分流器相对于系统接地端的 PWM 切换共模电压。与非隔离式电流检测放大器 INA241A 不同的是，AMC0106Mx 的 INP 和 INN 差动输入引脚相对于模拟接地端 AGND 的共模输入电压范围要小得多，分别为 $V_{CM} = 1\text{V}$ 至 -160mV (AMC0106M25) 和 $V_{CM} = 1\text{V}$ 至 -32mV (AMC0106M05)。因此，AMC0106Mx 的 AGND 必须连接至分流器的其中一个端子，具体取决于所需的电流方向。

在实际应用中，这两种不同的规格旨在解决确定电机控制系统中的最大允许电压这一核心问题。无论是应对非隔离式设计中的共模电压，还是应对隔离式架构中的工作电压，工程师都必须确认其系统中的器件始终保持在规定限值以内，才能维持精确测量。从根本上说，关键区别在于每种架构如何处理这些共模电压应力。例如，像 AMC0106M05 这类隔离式器件通过电气隔离提供了内在保护，而非隔离式设计则需要进行精心的系统级设计来管理电压差。这通常是较高电压系统中的一个重要区别；但是在约 48V 的低压设计中，该问题没有那么关键，因为电压远低于两种设计的最大范围。

2.2 器件架构比较

2.2.1 INA241：具有固有 PWM 抑制能力的非隔离式模拟放大器

INA241 采用高性能模拟放大器架构，针对速度和简单性进行了优化。INA241 的非隔离式设计使用一个公共接地基准，既用于内部电路也用于输出，简化了 PCB 布局并减少了元件数量。模拟输出接口可直接获取放大后的电流信号，无需复杂的数字滤波或处理。该器件的精简架构有助于实现高达 1MHz 的带宽规格，使 INA241 成为需要低延迟控制环路的应用的绝佳选择。模拟接口支持与现有模数转换器和控制系统直接集成。然而，在这些电机控制系统中，像电流检测放大器这类模拟器件通常会采用消隐期，即约 2 μ s 至 3 μ s 的死区时间，在此期间不会进行测量，以避免 PWM 开关期间产生的伪影和噪声尖峰。随着 PWM 开关频率提高，这些消隐期可能导致丢失读数和获得错误数据。为应对这一问题，INA241 采用开关电容器滤波器架构来衰减开关噪声。该滤波器会根据 PWM 频率（最高 125kHz）的变化，或当每个共模瞬变之间的间隔大于 3 μ s 时，动态调整采样率。

INA241 的另一个优势是 PWM 抑制特性以及高共模抑制比 (CMRR)。然而，在这些电机控制系统中，像电流检测放大器这类模拟器件会承受较大的共模 $\Delta V/\Delta t$ 瞬变。与 PWM 信号相关的大 $\Delta V/\Delta t$ 共模瞬变用于电机或螺线管驱动和开关电源等应用。电流检测放大器输出端可能发生的共模瞬变干扰会导致错误的测量，并在输出有效时施加限制。INA241x 设计有增强的 PWM 抑制特性，这是一项高共模抑制技术，可将器件输出保持 1 μ s，从而防止共模扰动传播到输出端。如果在接下来的 3 μ s 内发生另一次共模瞬变，则 INA241x 依赖高带宽和交流 CMRR 来减弱共模瞬态的影响。在高达 125kHz 的 PWM 频率下，或如果共模瞬态边沿间隔为 3 μ s 或更长时间，可实现增强型 PWM 抑制。因此，使用 INA241x 可使系统设计变得简单。与传统电流检测放大器相比，高交流 CMRR 与信号带宽相结合，使得 INA241x 可在共模转换期间尽可能地减小输出干扰和振铃。

2.2.2 AMC0106：高 CMRR 功能型隔离式 Δ - Σ 调制器

AMC0106 采用高性能隔离式 Δ - Σ 调制器架构，具有若干独特优势。该器件的功能隔离在交流电机回路中的高压检测输入端与低压数字接口之间形成了完全的电隔离，消除了接地环路隐患，并增强了安全性。该器件输出数字位流，可直接与现代处理器通信，从而在数据传输过程中实现优异的防噪性能。还需注意，AMC0106 采用独立的高侧与低侧接地基准：GND1 连接到高压侧，输入级不会出现共模瞬变。这种双接地端架构本身可以抑制 PWM 开关噪声，因为高频开关伪影仍被隔离在高侧接地端，不会耦合进入数字通信路径，且无需任何专门针对 PWM 抑制的电路设计技巧。该设计对电机驱动应用中常见的开关噪声提供了优异的抗扰能力，尤其是在开关速度不断提高的趋势下。

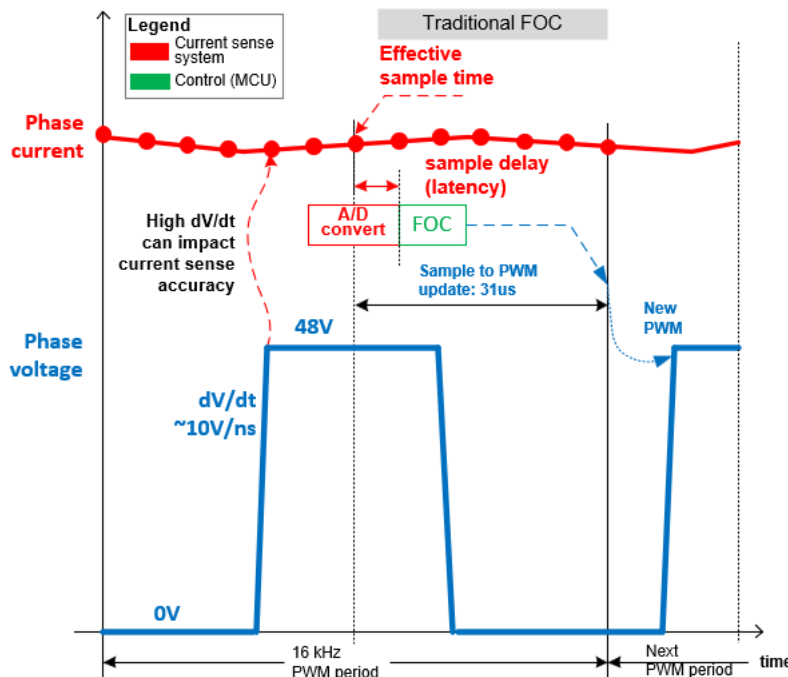


图 2-2. 闭环相电流控制和短路检测中的电流采样

如今许多模拟设计不得不采用消隐期来应对开关周期内出现的噪声尖峰。随着开关频率提高，PWM 周期时间缩短，固定的消隐期将占用越来越多的可用时间，从而可能导致数据采集出现问题。德州仪器 (TI) 的 AMC0106M05 和 AMC0106M25 调制器具有 150V/ns 的高 CMTI，允许始终连续采样，并凭借器件的功能隔离实现固有的防噪性能，因此无需消隐期。这使其能在整个 PWM 开关周期内连续测量，从而时刻掌握电机状态。

2.3 性能优势分析

2.3.1 准确性与精度

两款器件均实现了低于 1% 的出色测量误差，可满足精密电机控制应用的严苛要求。但是，AMC0106M05 的数字架构在保持低噪声和高分辨率方面具有固有优势。该隔离式 Δ - Σ 调制器通过过采样和数字滤波提供了优异的分辨率，同时数字接口消除了长走线可能导致的模拟信号劣化。如图 2-3 所示，AMC0106 可实现 14 位有效位数，这是当今市场上最高的分辨率！更高的分辨率可降低转矩纹波，从而能够更精确地保持位置，实现更精准的运动，并减少稳定状态运行时的抖动。

INA241 虽无法达到同等分辨率，但仍拥有非常可靠、可实现的 11 位 ENOB。有鉴于此，INA241 的模拟架构能够即时提供信号，处理需求极低；然而在电气条件恶劣的环境中，模拟信号更容易受到板级噪声和干扰的影响。这一架构使 INA241 在 1MHz 带宽下的传播延迟仅为 0.25 μ s，而 AMC0106 因额外的滤波需求，传播延迟为 2.4 μ s 至 9.6 μ s，但也因此获得了对噪声耦合的防护能力。

2.3.2 防噪性能

INA241 在器件内部集成了增强型 PWM 抑制滤波功能，允许器件在 PWM 开关期间根据需要自动对信号进行消隐，以对电流测量进行定时，并施加适当的滤波器，从而最大限度降低开关瞬变的影响。这使得 INA241 即便在存在显著 PWM 引发噪声的情况下也能提供精确的电流测量。

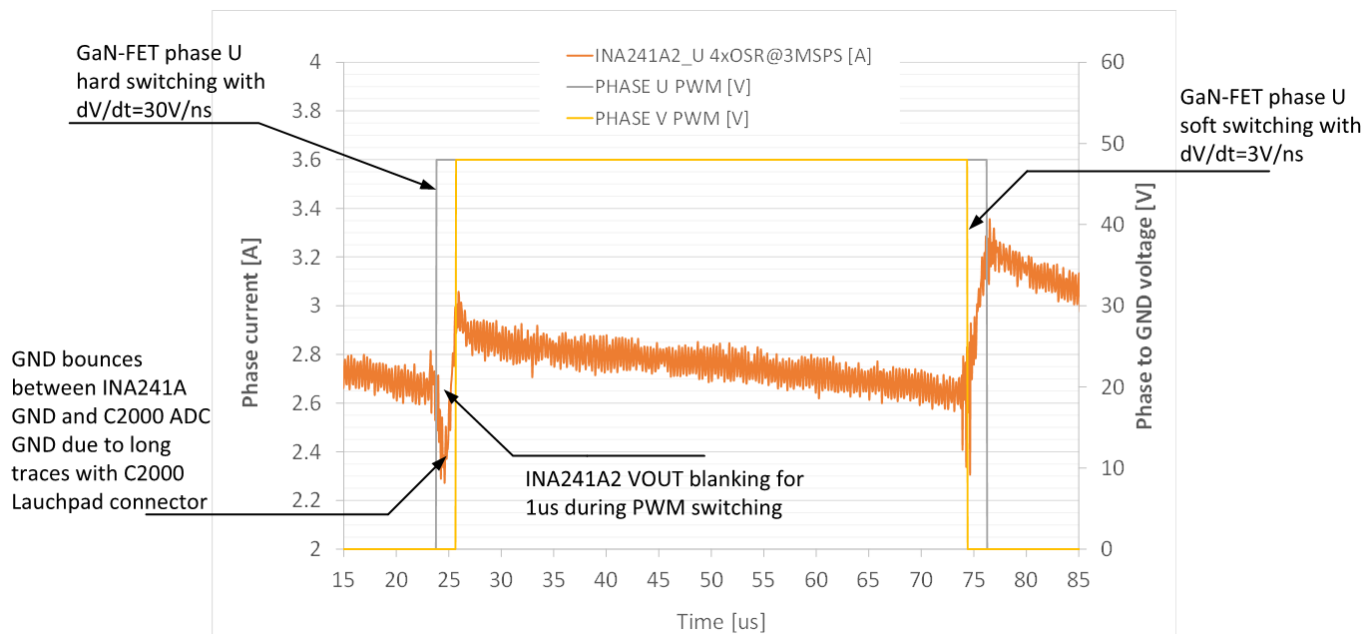


图 2-3. INA241 具备消隐期和高 PWM 抑制滤波架构，在 3MSPS ADC 下采用 4 倍过采样与平均计算，延迟为 500ns

类似地，AMC0106M05 通过多种机制展现出优异的防噪性能。该器件的电气隔离功能可防止因 PWM 开关噪声引发的误差，同时数字位流输出在信号传输期间不受模拟干扰的影响。双接地架构通过将开关噪声隔离在高侧接地平面，提供了优异的 PWM 抑制能力。

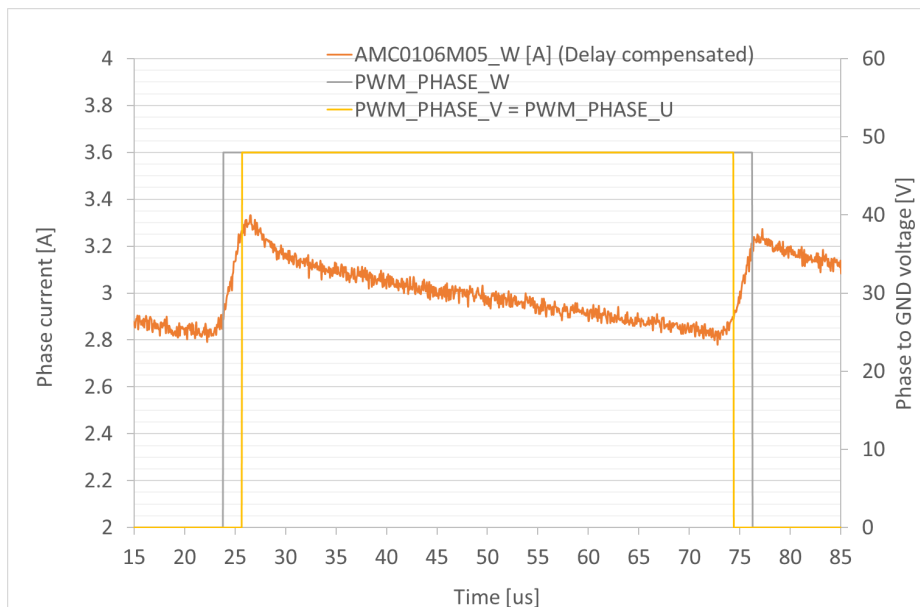


图 2-4. AMC0106 为高侧和低侧提供独立的接地端，以实现最佳防噪性能

2.3.3 尺寸

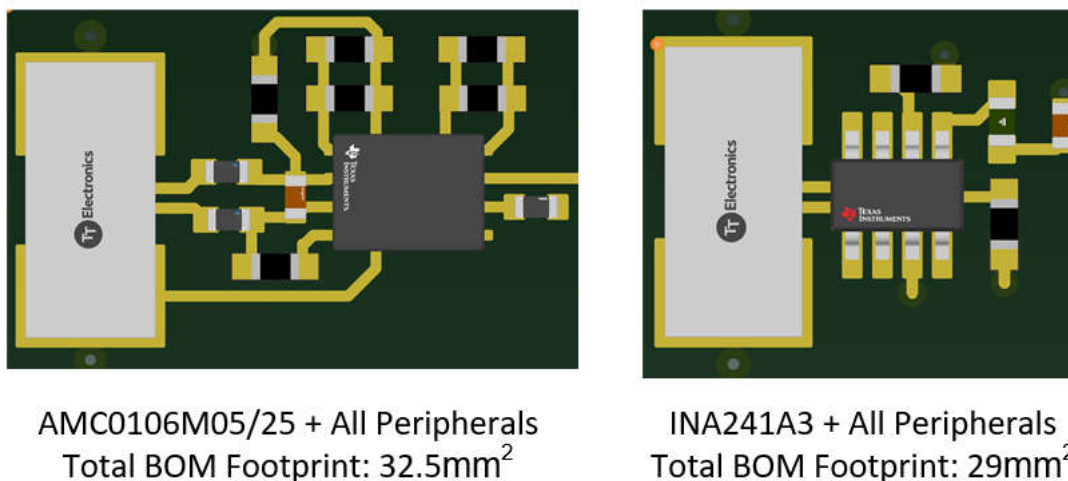


图 2-5. 德州仪器 (TI) 以同样出色的尺寸提供极具竞争力的设计

AMC0106 和 INA241 均具有极具竞争力的总设计尺寸，分别为 32.5mm² 和 29mm²，使其非常适合空间受限的无人机、机器人或基于低压伺服驱动器的电机控制应用。

2.3.4 设计注意事项

关于 AMC0106 的实现，设计人员需要牢记两点关键要求。首先，为了提供高防噪性能，该器件包含一个隔离栅，这意味着器件的“高”侧和“低”侧需要分别供电。克服这一障碍最常用的方法是使用高侧栅极驱动器电源。其次，为了实现最高 14 位的分辨率以及与 MCU 的直接连接，AMC0106 是一款调制器器件，需要一个内置 $\Sigma-\Delta$ 滤波器通道的处理器。INA241 则简化了实现过程，仅需一个 ADC 将模拟输出转换为所需的数字输出。基准电压也有助于实现器件所能达到的最佳精度。

3 总结

AMC0106M05 隔离式电流检测调制器和 INA241 非隔离式电流检测放大器各自为精密电机控制应用提供了独特的优势。AMC0106M05 的隔离式 Δ - Σ 架构通过电气隔离和双接地端设计，对接地环路、PWM 开关噪声及其他电气干扰具有固有的抗扰能力。这使得该器件无需外部消隐或时序协调即可保持优异的精度和分辨率。相反，INA241 的高性能模拟方法优先考虑速度和简单性，并辅以先进的 PWM 抑制滤波，可最大限度减少开关瞬变的影响。

技术	分流器 + AMC0106Mxx	分流器 + INA241x
示例器件	AMC0106M05	INA241A3
评估模块	BP-AMC0106-LMG-MD	INA241AEVM
电流范围 (FSR) ⁸	可扩展至 $\pm 200\text{A}$	可扩展至 $\pm 200\text{A}$
过载电流	高 (18 倍 FSR)	高 (18 倍 FSR)
精度 (-40 至 85°C , 典型值)	<1%	<1%
ENOB (SNR)	>12bit	9 至 11 位
带宽	40kHz 至 160kHz (Sinc3 OSR32-128)	1MHz
传播延迟	中 (2.4 至 9.6 μs) 源于 Sinc3 滤波器	低 (0.25 μs)
对 GND 噪声的抗扰度	高 (数字接口)	中 (模拟接口)
PWM 抑制	高 (功能隔离)	中
隔离式电源	是	否
其他要求	需要具有 sinc 滤波器和高侧电源的 MCU	用于实现最佳精度的电压基准

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [TIDA-010979](#) : 带工业通信功能的 48V 1kW 机器人关节联合电机控制参考设计, 参考设计。
2. 德州仪器 (TI), [TIDA-010956](#) : 用于集成电机驱动的 48V/85A 小尺寸三相逆变器, 参考设计
3. 德州仪器 (TI), [AMC0106](#) 评估模块, 评估模块。
4. 德州仪器 (TI), [INA241A](#) 评估模块, 评估模块。
5. 德州仪器 (TI), [人形机器人中的电流检测](#), 应用简报。
6. 德州仪器 (TI), [隔离信号链解决方案工程师指南](#), 电子书。
7. 德州仪器 (TI), [适用于 48V 机器人和伺服驱动器的高分辨率、小尺寸相电流检测](#), 应用手册。
8. 德州仪器 (TI), [先进的电流和电压检测技术如何实现超精密机器人](#), 技术文章。
9. 德州仪器 (TI), [人形机器人中的电机控制](#), 应用简报。
10. 德州仪器 (TI), [移动机器人中的电流检测](#), 应用简报。
11. 德州仪器 (TI), [协作式和工业机械臂中的电流检测](#), 应用简报。
12. 德州仪器 (TI), [人形机器人中的检测](#), 应用简报。

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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月