

# 选择三相电机驱动器中使用的基于分流器的电流采样放大器

作者: Martin Staebler  
工业系统部门的系统工程师

## 简介

精确的相电流采样会对矢量控制的工业电机驱动器三相逆变器的性能产生重大影响。可以通过霍尔效应传感器、磁通门传感器、基于变压器的磁传感器或分流电阻器来测量电机相电流。磁传感器可提供天然的隔离和宽电流范围，而分流器解决方案则是具有成本效益的高线性、高带宽采样选项。相电流可能会高达 100A，三相逆变器的工作电压介于 110 到 690VAC 或 12 到 60VDC 之间。为了获得电机相电流，通常将分流器放在 GND 的直流链路回路处、底部开关与 GND 之间或者与电机的三相电源串联(参阅图 1)。

每个分流器位置都各自利弊且具体要求不一，因此放大器可以将小分流电压转换为模拟信号或数字信号以供微控制器 (MCU) 处理。图 2 显示了每个分流器位置在一个脉宽调制 (PWM) 周期中的理想分流电流与相电流。从系统的角度来看，电机直列式分流器可提供重要的性能优势，而从放大器的角度来看，低侧分流器是成本更低的解决方案，如下一页的表 1 所示。

图 1. 三相逆变器中的分流器选项

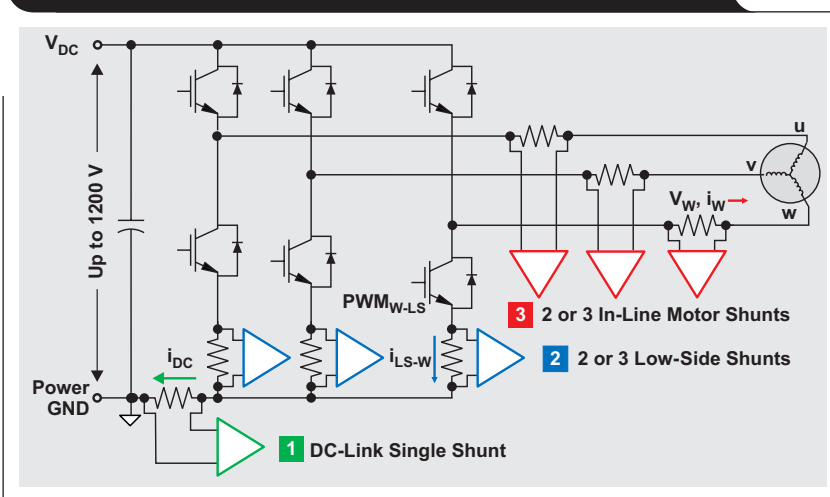


图 2. 取决于分流器位置的分流器电流、相电流和共模

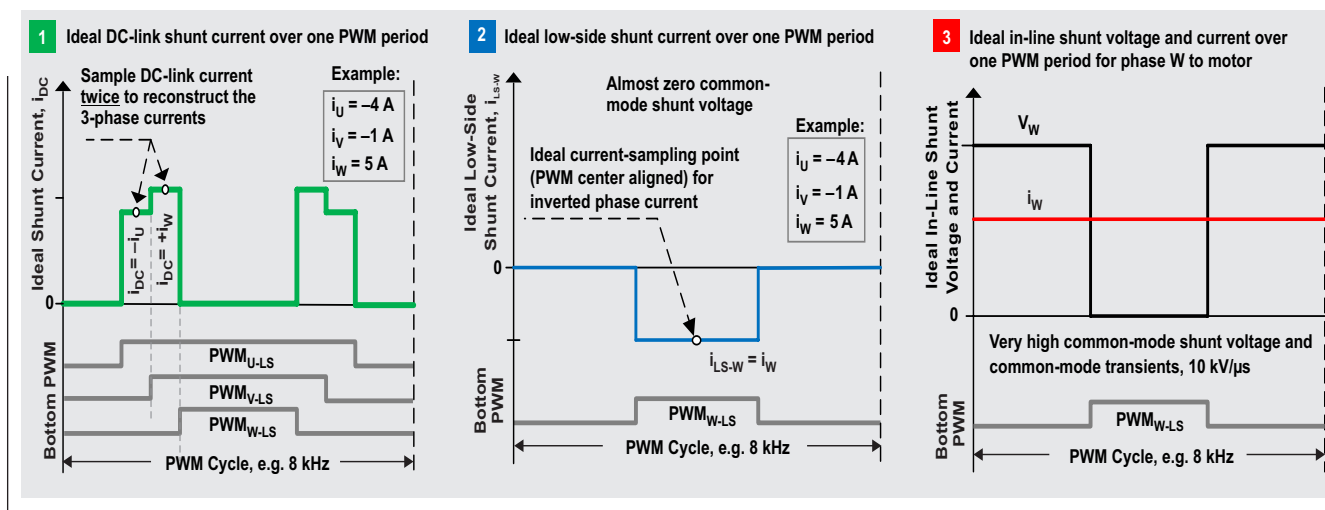


表 1. 用于测量电机相电流的分流器位置的比较

	优势	挑战	精度
直列式电机分流器	<ul style="list-style-type: none"> <li>直接、连续的相电流采样。</li> <li>允许在一个 PWM 周期中均摊相电流, 以获得更高的精度以及/或者让电流控制器能够在每个 PWM 中运行两次。</li> <li>检测相间短路和相位与接地之间的短路。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放大器需要使用具有高共模抑制比 (CMRR) 的高共模输入电压。</li> <li>交流线路馈送逆变器通常采用一种隔离方法。</li> </ul>	高
低侧分流	<ul style="list-style-type: none"> <li>可检测击穿。</li> <li>较低的系统成本: 由于共模输入电压几乎为零, 因此可以使用非隔离式电流采样放大器/运算放大器。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>间接、不连续的逆变相电流采样。只能在低侧开关打开时测量。</li> <li>无法在一个 PWM 周期中均摊和让电流控制器在每个 PWM 中运行两次。</li> <li>无法检测相位与接地之间的短路。</li> </ul>	中
直流链路单一分流器	<ul style="list-style-type: none"> <li>可以与矢量控制和梯形控制配合使用。</li> <li>适用于使用通用接地的智能电源模块。</li> <li>较低的系统成本: 由于共模输入电压几乎为零, 因此可以使用非隔离式电流采样放大器/运算放大器。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在每个 PWM 周期中, 要求执行两次与 PWM 模式同步的测量。</li> <li>要求每个激活的 PWM 模式达到最短持续时间, 并采用 PWM 补偿算法以确保达到最短持续时间。</li> <li>需要使用具有高带宽和高压摆率的放大器。</li> </ul>	低

在基于分流器的系统中, 分流电阻和封装要同时兼顾精度、热性能、印刷电路板 (PCB) 尺寸和成本。在电机驱动器中, 分流电阻确保在最大相电流时的压降通常介于  $\pm 25\text{mV}$  到  $\pm 250\text{mV}$  之间。随后的放大器将小双极分流电压转换为典型的单极输出电压, 并使偏置电流与 ADC 的 3V 到 5V 输入范围匹配。增益设置通常介于 10 到 100 之间。

对于这三种分流器位置, 随温度变化的分流电阻容差和偏移以及放大器的增益、输入失调电压和相关漂移都会对精度产生类似的影响。

考虑一个最大电压为  $\pm 50\text{mV}$  (100mV 满量程输入范围) 的示例分流器, 并假设每个参数在工业温度范围内都不会造成超过  $\pm 0.1\%$  的绝对误差。这样就要求放大器输入失调电压  $\leq 100\mu\text{V}$  且失调电压漂移  $\leq 1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。放大器的增益设置电阻器以及分流器需要具有 0.1% 的容差以及  $\leq 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$  的漂移。当然, 并非所有驱动器都要求如此高的精度和参数尺度。与增益误差不同, 失调电压误差通常更为关键, 因为它会造成与电流大小无关的绝对误差, 特别是在低电流条件下会影响逆变器的性能。

### 位置 1: 直流链路和接地之间的单一分流器

单一直流链路分流器在低成本、低功耗、矢量控制的风扇和泵中更为常用, 在工业交流和伺服驱动器中用的较少。每个 PWM 周期中, 必须在两种不同的 PWM 开关状态下测量两次直流链路电流, 以重建三相电流。要在如此小的电压条件下且在短测量周期内执行测量, 需要使用类似德州仪器 (TI) OPA835 的放大器。和参考 1 中所示的解决方案一样, 这款放大器可提供至少 20MHz 的高大信号单位增益带宽和可以在  $<1\mu\text{s}$  内趋稳的高压摆率 ( $>10\text{V}/\mu\text{s}$ )。这种方法不适用于零相电压, 因为除非使用复杂的 PWM 补偿算法延长, 否则所有三个 PWM 占空比都是 50%。

### 位置 2: 低侧分流器

低侧分流器非常适合功率高达约 5kW 的紧凑型交流线路馈送逆变器, 以及采用连接到电压接地的非隔离式控制 MCU 的 12 到 60VDC 馈送电机驱动器。这些分流器可以放在三相逆变器的两个或三个引脚上。

和随后的模数转换器 (ADC) 一样, 放大器最适合使用单电源运行。由于分流器压降以接地为基准, 因此接近于负轨

(接地) 的输入共模电压至关重要。为了在开关期间从接地反弹去耦, 差分到单端配置中的放大器会将小双极分流电压转换为单极电压 (通常为 0V 到 3.3V, 中偏置为 1.65V), 以驱动 ADC。放大器的关键参数包括:

- 输入共模电压几乎为零的轨至轨输入。
- 轨至轨输出。
- 单电源电压。
- 失调电压和失调电压漂移: 此参数可能不那么重要, 因为可以在低侧开关关闭时在每个 PWM 周期中测量失调电压。
- 带宽和压摆率: 这两个参数会影响最短稳定时间, 此时间应小于客户的特定低侧开关的最短导通时间。

当使用三个分流器时, 用于实现极低低侧打开时间的权变措施应当只考虑具有最长打开时间的两个相位, 并计算出第三个相位。这种方法不适用于双分流器解决方案; 放大器必须至少在指定的最短打开时间内趋稳, 通常甚至要在一半的最短打开时间内趋稳, 因为 PWM 通常以对称方式对电流进行采样。表 2 提供了单位带宽增益积为 10MHz 的放大器 (例如 TLV9062) 的示例稳定时间。

为了简化物料清单, 也可以使用具有内部固定增益设置的放大器 (例如 INAx181)。

### 位置 3: 直列式电机分流器

#### 非隔离式直列式相电流采样

对于 12 到 60VDC 馈送逆变器, 非隔离式电流采样放大器以直流接地为基准, 这种方法因可降低系统成本而极具吸引力。它面临的主要挑战在于可达满量程分流电压 100 到 1000 倍的高共模电压。这样就需要使用具有以下特性的放大器:

- 非常高的直流和交流 CMRR, 可精确测量电流, 而不会在瞬变之后产生恢复纹波。直流 CMRR 应至少为 -100dB, 输出应在几微秒内趋稳。表 3 概要介绍了 CMRR 的影响。
- 用于在开关期间提供裕度的至少 -1V 到 70V 的宽共模电压范围, 且直流链路电压在电机制动期间增大。

和随后的 ADC 或嵌入了 MCU 的 ADC 一样, 放大器最适合使用 3.3V 单电源。这样就无需使用钳位二极管来保护

ADC 输入。具有 400kHz 配置增益的放大器带宽可提供用时  $\leq 1\mu\text{s}$  (10% 到 90%) 的过电流采样。采用这种配置时, 很难补偿失调电压和增益误差, 特别是在工作温度范围内。如前所述, 失调电压和失调电压漂移对于逆变器的低电流性能至关重要, 可接受的失调电压误差取决于所需的电流测量精度。

图 3 显示了采用增强 PWM 抑制和 48V 三相氮化镓 (GaN) 逆变器的电流采样放大器 (INA240) 的瞬态响应。借助高的直流和交流共模抑制, 相电流可以在大约  $2.5\mu\text{s}$  内趋稳。假设执行中心对齐的采样, 为了精确测量相应相电流而需要的最短 PWM 开通或关断时间为  $5\mu\text{s}$ 。为了缩短开通/关断时间, 使用三分流器方法可以从另外两个具有更长开通/关断时间的相位计算出第三个相电流。

### 隔离式直列式相电流采样

对于具有 300 到 1200VDC 直流链路电压的交流线路馈送逆变器, 隔离式放大器或  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器可通过直列式分流器提供精确的相电流采样。隔离功能可以对表 1 中所示的高共模电压和瞬变进行抑制。由于工业电机驱动器需要满足国际电工委员会 (IEC) 61800-5-1 电气安全要求, 因此需要进行基本绝缘或增强绝缘。基本或增强隔离式放大器和  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器可用于此目的。

### 隔离式 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器

图 4 显示了使用直列式分流器和隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器执行的隔离相电流测量。这种方法可以测量三相电流, 也可以测量两相电流并相应计算出第三个相电流。浮地分流电压经过低通滤波、放大并馈送到二阶  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器中, 随后与输出隔离。隔离式输出是调制器时钟频率 (通常为 5 到 20MHz) 下的 1 和 0 组成的位流。MCU 中的抽取滤波器必须处理此位流, 以获得精确的高分辨率结果。

从系统的角度来看, 隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器应当提供:

1. 一个带有抗混叠滤波器的增益放大器, 此滤波器具有:
  - $\pm 50\text{mV}$  的输入范围, 与传统的  $\pm 250\text{mV}$  范围相比, 可以将分流器损耗减少 80%。
  - 非常低的增益、失调电压和相关漂移对于精度至关重要, 因为很难对它们进行补偿。非常低并具有  $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  漂移的  $50\mu\text{V}$  失调电压可以在  $25^\circ\text{C}$  到  $85^\circ\text{C}$  的温度范围内实现小于 0.11% 的误差。
  - 集成式抗混叠滤波器会将噪声衰减到调制器时钟频率的一半以上, 以免噪声再次混叠并影响目标频带内的精度。
  - 共模输入电压应当至少是负满量程输入范围的一半。

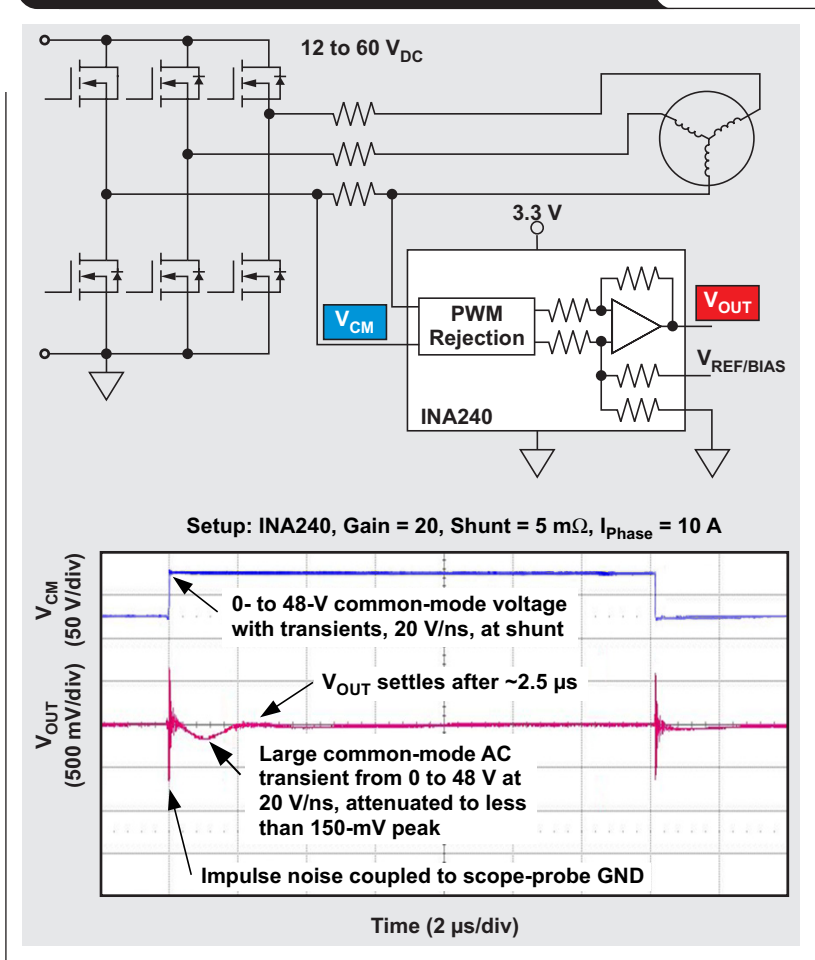
表 2. 稳定时间和放大器增益带宽

运算放大器单位增益带宽	增益	带宽	3.3V 时的最小压摆率	精度达 1% 的稳定时间	精度达 3% 的稳定时间
10MHz	20	500kHz	$\geq 3\text{V}/\mu\text{s}$	$1.5\mu\text{s}$	$1.1\mu\text{s}$
10MHz	50	200kHz	$\geq 1.2\text{V}/\mu\text{s}$	$3.7\mu\text{s}$	$2.7\mu\text{s}$

表 3. CMRR 对精度的影响

参数	值	精度和 $\pm 50\text{mW}$ 的功率	注释
CMRR (直流)	-120dB	0.1%	在 48V 共模时
CMRR (交流)	-90dB	3.3%	在 0 到 48V 共模瞬态时, 快速趋稳需要“PWM 抑制”

图 3. 在 48V 时的一个 PWM 周期中的直列式电流采样放大器和瞬态响应



- 以 20MHz 时钟频率运行的  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器, 以便能够执行高精度、高线性、低延迟的电流采样。具有曼彻斯特编码位流选项的调制器可以简化从处理器到所有三个调制器的时钟路径。
- 宽范围高侧电源电压和低电流损耗, 最好使用具有集成式 LDO 的器件 (例如 AMC1304), 以便能够使用浮动栅极驱动电源。
- 诊断功能, 可检测高侧功率损耗, 以免获得难以预料的测量结果。
- 基本或增强隔离, 对电磁场具有高抗扰度并具有至少 10kV/ $\mu$ s 的高共模瞬态抗扰度 (CMTI), 可抑制开关节点瞬态。
- CMOS 或 LVDS 数字接口选项: 在高噪声环境中对于长走线, LVDS 可实现更高的共模噪声抗扰度。

处理器的抽取低通滤波器 (例如 sinc 滤波器) 通过切断高频噪声来设置输出信号的带宽和分辨率。有效位数 (ENOB) 和稳定时间会随着 sinc 滤波器阶数和过采样率的增大而增加; 参阅图 5。数字滤波器的优势是在软件中配置分辨率与带宽和稳定时间的关系以及可以对同一个位流应用两个或更多的滤波器。这样即可实现高分辨率相电流, 以进行精确控制 (例如使用 sinc<sup>3</sup> 滤波器实现的 12 ENOB 和 64 次过采样) 和非常快的过电流采样 (例如使用 sinc<sup>3</sup> 滤波器实现的 1.2 $\mu$ s 和 8 次过采样)。

### 隔离式放大器

图 6 显示了使用隔离式放大器的相电流采样。隔离式放大器的非隔离式子系统 (以红色绘制) 与图 4 中的隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器的子系统相同。主要区别在于, 它包含一个输出滤波器 (以蓝色绘制的子系统)。具有固定截止频率的有源低通滤波器可消除位流中的高频率量化噪声, 并提供高线性差分模拟输出。 $\Delta$ - $\Sigma$  调制器的第 1 条到第 5 条系统注意事项也适用于隔离式放大器。但模拟带宽和稳定时间由硬件固定, 并取决于器件的特定振荡器时钟和隔离式放大器的低通滤波器。

基于隔离式放大器的相电流采样系统具有三个转换级: 隔离式放大器、一个额外的差分到单端放大器和通常单端的 12 位 SAR ADC。短路检测要求每个相位具有一个额外的窗口比较器。

主要系统优势在于, 简单的模拟接口可连接多种嵌入了 ADC 的 MCU。对于单端 ADC, 需要另一个不会导致性能下降的运算放大器。为了提高噪声抗扰度, 应将运算放大器放在靠近 MCU 的位置, 以保持尽可能长的模拟走线差分。从纯系统性能的角度来看, 隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器系统更为出色。表 4 提供了比较。

图 4. 采用隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器且基于直列式分流器的相电流采样

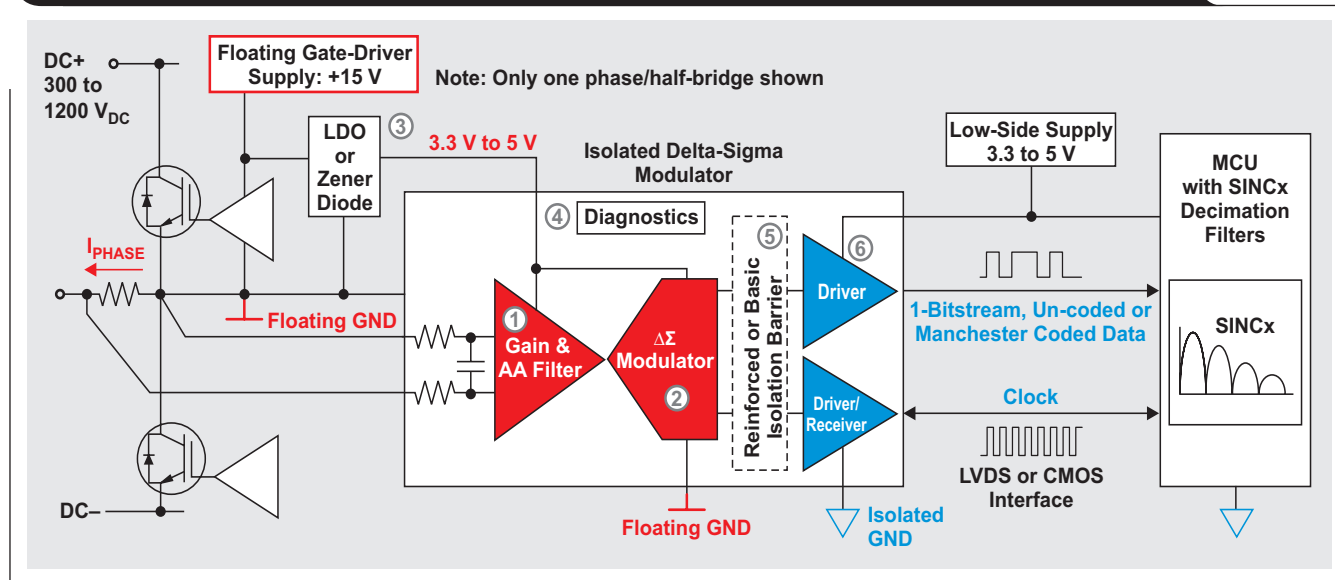




图 5.20MHz 调制器时钟 (AMC1306) 的 ENOB 和 OSR 以及稳定时间

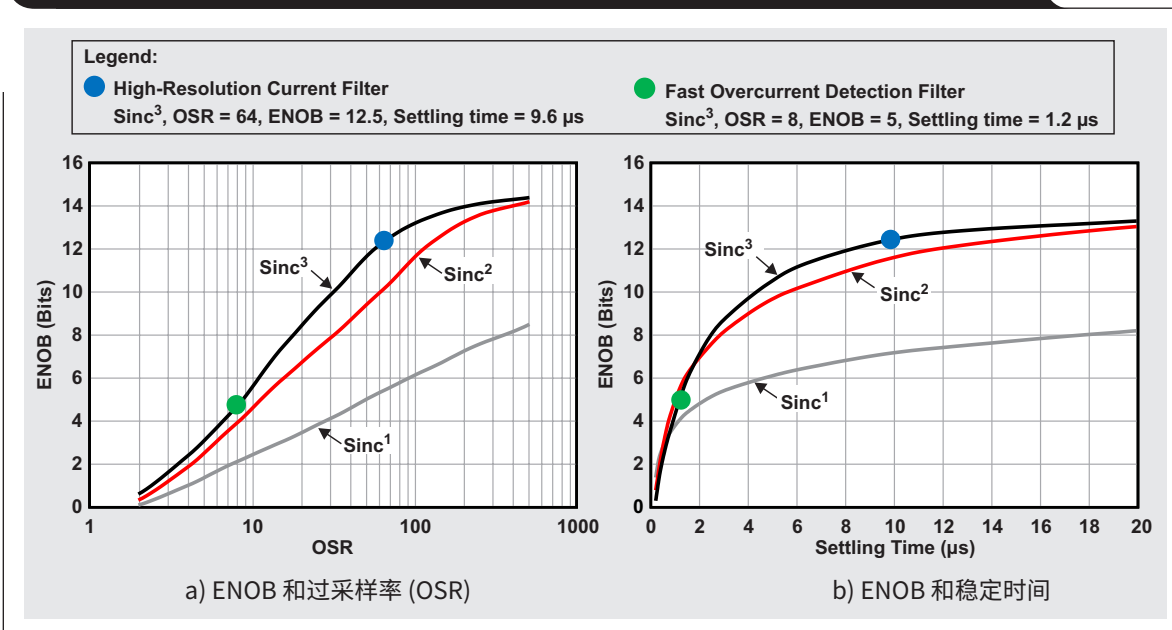


图 6.采用隔离式放大器且基于直列式分流器的相电流采样

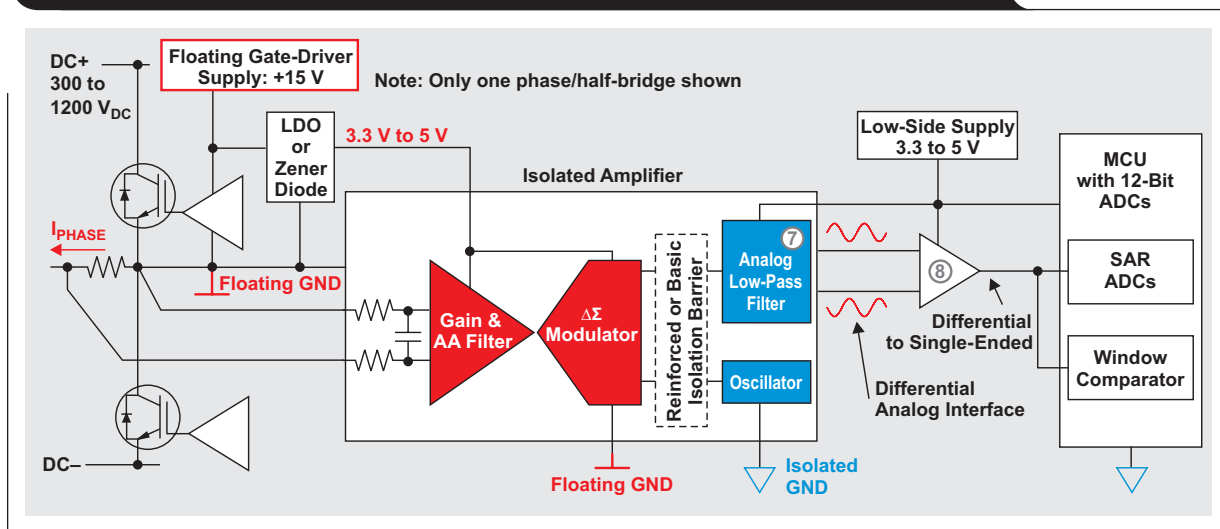


表 4.隔离式放大器与隔离式 Δ-Σ 调制器的比较

参数	隔离型放大器	隔离型 Δ-Σ 调制器
分辨率/精度	三个转换级:系统分辨率也会受到通常 ≤12 位的外部 ADC 的影响。	单一模数转换:可实现 16 位分辨率、14 位精度,数字滤波器配置待定。请参阅图 5。
带宽/稳定时间	固定.高性能放大器可提供 300kHz 的带宽和不到 3μs 的稳定时间。	灵活.处理器上的数字滤波器待定。请参阅图 5。
短路检测	需要使用额外的模拟硬件(窗口比较器)。	无需使用额外的硬件;在处理器上计算出。
处理器的接口	模拟差分接口:可轻松连接到任何嵌入了 SAR ADC 的 MCU,但需要使用额外的放大器。	CMOS 或 LVDS 接口.需要使用性能更高并具有集成式 Δ-Σ 接口或现场可编程门阵列 (FPGA) 的 MCU/微处理器单元 (MPU)。
EMC 抗扰度	中等,因为使用的是模拟差分输出信号	高到非常高,因为使用的是数字信号和 LVDS 接口选项。

## 结论

TI 为本文中介绍的每种系统配置提供了一个参考设计, 并提供了详细的硬件设计指南和系统测试结果。

## 参考文献

1. 三相逆变器中的稳定时间  $<1\mu\text{s}$  的单分流、双分流和三分流 FOC 电流采样”, 德州仪器 (TI) 参考设计 (TIDA-00778)。
2. Harald Parzuber, “高精度电机驱动控制能够促进工业发展”。德州仪器 (TI) 白皮书 (SLYY117), 2017 年。
3. Jason Bridgmon 和 Carolus Andrews, “适用于直列式电机控制应用的电流采样”, 德州仪器 (TI) 应用报告 (SBOA172), 2016 年 10 月。
4. Scott Hill, “适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”。德州仪器 (TI) 应用手册 (SBOA161B), 2017 年。

## TI 参考设计

“三相逆变器中的稳定时间  $<1\mu\text{s}$  的单分流、双分流和三分流 FOC 电流采样”(TIDA-00778)

“具有基于分流器的直列式电机相电流采样功能的 48V 三相逆变器参考设计”(TIDA-00913)

“使用小型  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器执行增强型隔离式相电流采样参考设计”(TIDA-00914)

“用于三相逆变器的高带宽相电流和直流链路电压检测参考设计”(TIDA-01541)

## 相关网站

产品信息:

工业电机驱动

电流检测放大器模拟输出

隔离式 ADC

隔离式放大器

通用运算放大器

精密运算放大器

## TI 全球技术支持

---

### TI 支持

感谢您的订购。要查找有关您支持需求的答复或联系我们的支持中心, 请访问

[www.ti.com.cn/support](http://www.ti.com.cn/support)

中国: <http://www.ti.com.cn/guidedsupport/cn/docs/supporthome.tsp>

日本: <http://www.tij.co.jp/guidedsupport/jp/docs/supporthome.tsp>

### 技术支持论坛

在 TI 的 E™ 社区 (工程师对工程师) 中搜索数百万个技术问题和答案, 请访问 e2

[e2e.ti.com](http://e2e.ti.com)

中国: <http://www.deyisupport.com/>

日本: <http://e2e.ti.com/group/jp/>

### TI 培训

从技术基础到高级实施, 我们提供点播和直播培训以帮助您实现下一代设计。即刻体验, 请访问

[training.ti.com](http://training.ti.com)

中国: <http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/gencontent.tsp?contentId=71968>

日本: <https://training.ti.com/jp>

**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。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

A011617

E2E 是德州仪器 (TI) 的商标。All other trademarks are the property of their respective owners.

© 德州仪器 (TI) 公司 2019 年版权所有。保留所有权利。



ZHCT328

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司