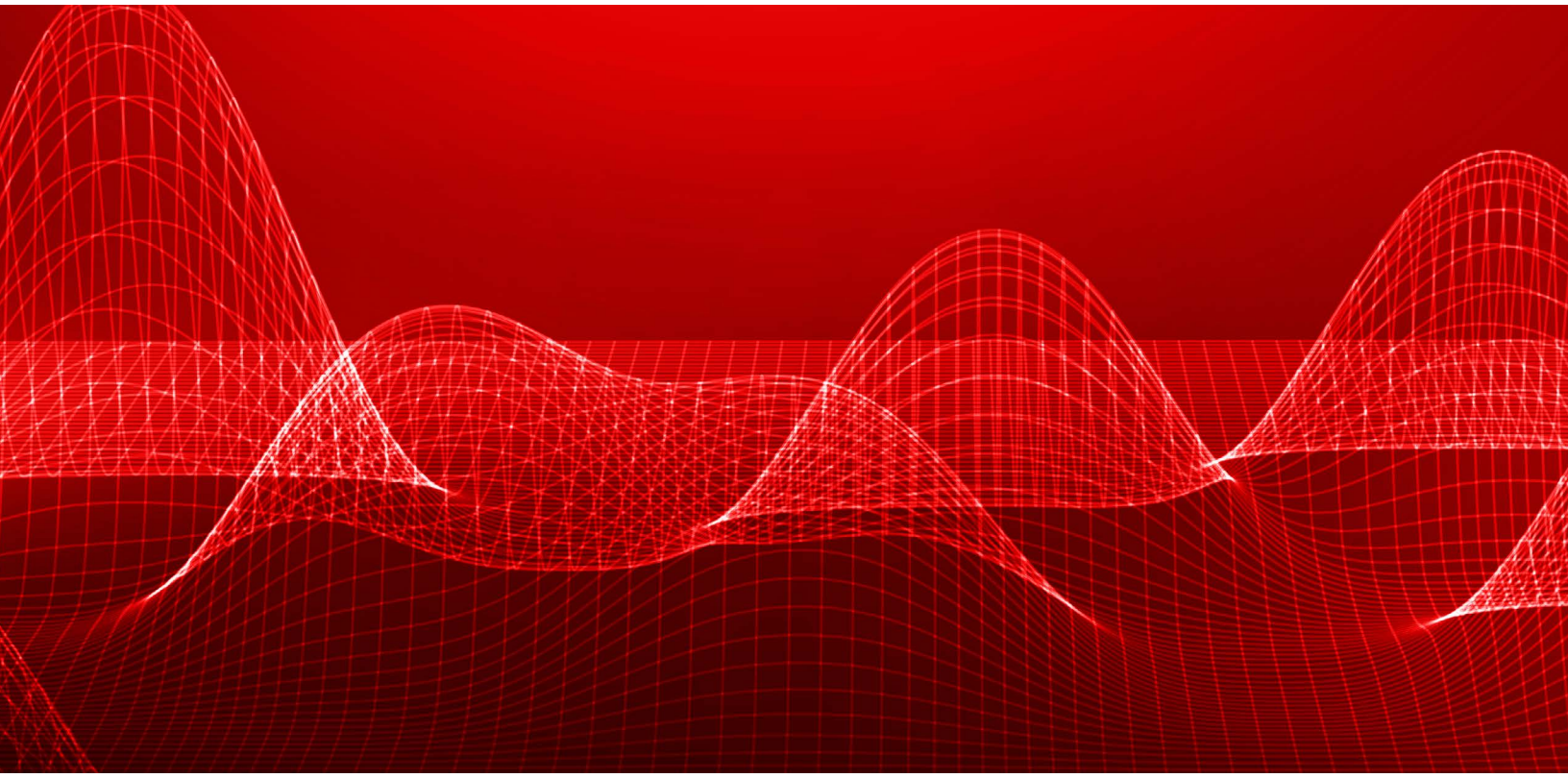


简化电流检测设计
如何使用电流检测放大器优化你的电路设计?

Texas Instruments

目录

简介 3

第 1 章：电流检测概述

集成电阻器电流传感器如何简化 PCB 设计.....4

适用于 HEV 和 EV 中的 BMS 应用且基于分流器的 电流感应解决方案.....6

多通道电流监测的常见用途.....9

使用数字电流传感器进行功耗和能耗监测.....11

汽车模块中的 12V 电池监控.....14

简化电池测试设备中的电压和电流测量.....17

第 2 章：超出范围电流测量

测量电流以检测超出范围的情况.....20

监测电流以识别多种超出范围的情况.....22

用于提供过流保护的高侧电机电流监测.....25

第 3 章：开关系统中的电流检测

具有增强型 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量 28

具有 PWM 抑制功能的高侧驱动、高侧电磁阀监视器.....30

开关电源中的电流模式控制.....32

电压节点要求.....34

使用高速放大器监测低侧分流电流，以增加测量带宽.....37

第 4 章：集成电流检测信号链

集成电流检测信号路径 40

集成电流检测电阻器 42

集成式电流检测模数转换器.....45

使用非比例式磁性电流传感器进行精密电流感应设计...47

第 5 章：宽 VIN 和隔离式电流测量

将差分输出（隔离式）放大器连接到单端输入 ADC 50

突破分立式电流检测放大器的最大共模范围 52

低温漂、高精度、隔离电流传感器在电机相线电流检测中的应用 55

作者:

Scott Hill, Dennis Hudgins, Arjun Prakash, Greg Hupp, Scott Vestal, Alex Smith, Leaphar Castro, Kevin Zhang, Maka Luo, Raphael Puzio, Kurt Eckles, Guang Zhou, Stephen Loveless, Peter Iliya

简介

如何平衡系统成本与系统性能是所有电路设计的一大重要考量，电流检测电路设计也不例外。

从使用通用运算放大器或模数转换器 (ADC)（无论是独立工具还是嵌入到微控制器 (MCU) 中），到利用各种专门为电流检测而设计的定制组件，不仅可以提供最大的灵活性，而且能够以特定方式

解决难题。

另一个难题是如何快速有效地缩小选择范围，找到与您的特定系统要求最为匹配的潜在器件。TI 应用手册通过解决特定用例，重点介绍如何识别电路/功能问题，以及简要介绍与该功能

相关的任何难题，从而让上述难题迎刃而解。此外，TI 应用手册还概述了能够支持该特定功能的潜在器件的简短列表，以及可能有益于其他电路优化的一些替代解决方案。

该电子书中所述的应用手册集没有详尽地列出所有电流检测难题和 TI 应用手册，但它确实解决了当今出现的许多更加常见且具有挑战性的功能电路。如果您对此处涉及的主题有任何疑问或者有任何其他电流检测疑问，请将其提交至 TI E2E™ 社区中的放大器论坛。

第 1 章：电流检测概述

集成电阻器电流传感器如何简化 PCB 设计

测量电流的最常用方法是检测分流器或电流检测电阻器上的压降。为了实现高度精确的

电流测量，您需要检查电阻器和电流检测放大器的参数值。电流检测电阻器和电流检测放大器之间恰当的布局对于避免精度下降而言非常重要。

图 1 显示了电流检测放大器的典型原理图，其中以阴影部分显示了高侧电流检测和重要设计区域的连接。

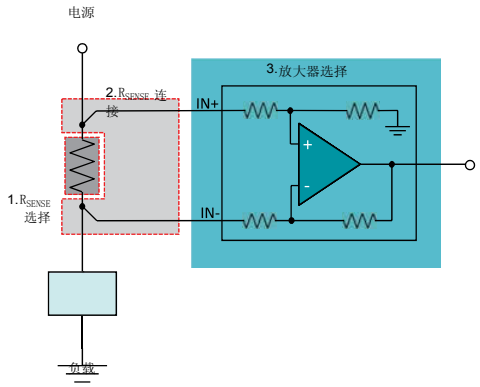


图 1：以阴影部分显示错误源的高侧电流检测

使用电流检测放大器时，电流检测或分流电阻器的选择是最重要的设计考量因素之一。设计时，通常需要首先选择电阻器值和

功率。电阻器的电阻值通常根据最大预期电流时实现所需最大差分电压来选择。还可以根据功率损耗预算来选择电阻器值。

确定电流检测电阻器的电阻值和功率后，要考虑的第二个参数就是电阻器容差，因为这将直接

影响检测的电压和电流测量的精度。不过，设计人员通常会忽略

一个更细微的参数 - 电阻器温度系数。温度系数通常以百万分率/摄氏度为单位，它很重要，因为电阻器的温度会因电流经过组件时损耗的功率而升高。低成本电阻器的额定容差通常小于 1%，但在实际应用中，电阻器的温漂会带来不利影响。

在您选择电阻器之后，您需要注意其印刷电路板 (PCB) 布局以获得准确的测量结果。为了准确测量电流，电流检测电阻器必须有四个连接。两个

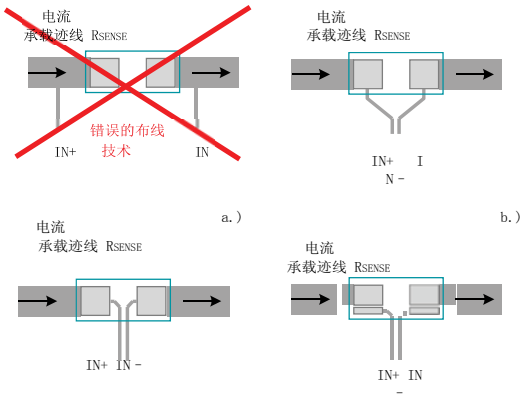


图 2：电流检测电阻器布局技术

布置电流检测电阻器时最常见的错误之一是将电流检测放大器输入端连接到电流承载迹线，而不是直接连接到电流检测电阻器，如图 2a 所示。图 2b、2c 和 2d 显示了连接电流检测电阻器的其他

有效方法。

图 2d 中的布局展示了到电流检测电阻器的独立四线（开尔文）连接。该技术最常用于分流电阻器的值低于 0.5mΩ 而且与电阻器连接串联的焊接电阻明显添加到总体分流电阻的情况。由于电阻精度很大程度上取决于制造电阻时所用的测量位置，因此很难知道

哪种布局技术会在最终的 PCB 设计上取得最好的结果。如果电阻器值是在焊盘内部测量的，那么图 2c 中展示的布局会提供最佳的测量结果。如果电阻器值是在侧面测量的，那么图 2b 中展示的布局会提供最高的精度。。选择最佳布局的困难之处在于，许多电阻器产品说明书并不针对获得最佳的电流检测精度提供布局建议，也不提及制造过程中使用的测量点。

将电流检测放大器与集成的电流检测电阻器搭配使用可以简化有关电阻器选择和 PCB 布局的难题。TI 的 INA250、INA253 和 INA260 器件在电流检测放大器的封装内集成了电流检测电阻器。与电流检测电阻器的连接已经过优化，可实现最佳测量精度和温度稳定性。INA250 和 IAN253

是模拟输出电流检测放大器，而 INA260 是数字输出电流传感器，可通过 I2C/系统管理总线 (SMBus) 接口报告电流、功耗和总线电压。图 3 是包含电阻器连接的 INA250 的方框图。

这些器件可提供外部检测连接（可实现分流电压的滤波）或到电流检测

放大器的直接连接。到分流电阻器的连接是内部固定的，因此可降低 PCB 布局的难度。放大器的增益已针对每个电阻器进行了优化，从而使总系统增益误差相当于使用 0.1% 或更低误差的电流检测电阻器。INA250、INA253 和 INA260 中

使用的集成分流技术可支持高达 15A 的工作电流。

INA250、INA253 和 INA260 的精度规格包含电阻器，因此可以简化组件选择。INA250 的系统总增益误差最大值在室温下是 0.3%，

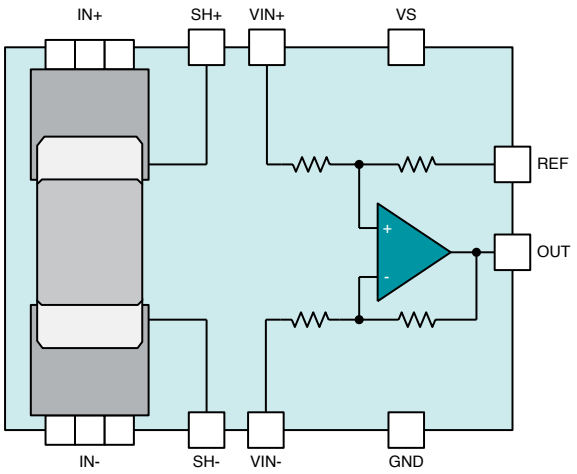


图 3：包含内部电阻器连接的 INA250 方框图

在 -40°C 到 125°C 的温度范围内是 0.75%。对于没有集成分流电阻器的器件，计算精度时必须考虑到器件增益误差、增益误差漂移、电阻容差和电阻器漂移，才能获得总体系统增益误差，因此可能很难挑选组件来满足总体系统精度规格。INA253 是一款能够承受 80V 电压的器件，它还在 -40°C 至 125°C 温度范围内具有 0.75% 的

温度范围.INA260 是一款数字电流输出器件，具有 0.15% 的最大总室温增益误差。该总增益误差已包括集成电阻器的变化和电流检测

放大器的增益误差。到电流检测电阻器的连接位于封装内部，并针对每个器件进行了校准，以消除电阻器连接点导致的变化。

在需要精确电流测量的设计中，集成的分流产品可提供更高的精度，而且可以降低总体解决方案成本。要使 INA260 实现类似的精度，需要使用增益误差小于 0.1% 的电流

检测放大器和初始容差小于 0.05% 的低漂移电阻器。一般来说，精度小于 0.1% 的大功率电阻器成本高昂，每 1,000 件可能需要数美元。

INA260 中的集成电阻器的另一个优势是电阻器值已经过校准，是在内部设置的，因此返回的电流值可轻松转换为安倍数。其他数字解决方案需要在内部或主机处理器中对电流检测电阻器的值进行编程，以便返回的电流读数可以相应地转换。

INA250、INA253 和 INA260 中使用的集成分流技术可精确测量电流，降低布局复杂性，更好地了解总系统误差，并且成本比同等精度的其他解决方案要低。在需要精密操作且需要支持高于 15A 的电流的应用中，您可以使用在菊链配置中并联多个 INA250 或 INA253器件（如其产品说明书中所示），或者使用多个 INA260 器件（只要主机处理器可以汇总报告的电流读数即可）。如果由于解决方案的大小而导致并联多个器件来监测高于 15A 的电流是不可行的，表 1 中列出了您可以用来监测较高电流的器件（使用外部分流电阻器）。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA226	使用 I2C 接口的数字输出，0.1% 增益误差，10µV 失调电压	分流电阻器在外部
INA233	使用 PMBus/I2C 接口的数字输出，0.1% 增益误差，10µV 失调电压	分流电阻器在外部
INA210C	模拟输出，0.5% 增益误差，35µV 失调电压	分流电阻器在外部

表 1：备选器件建议

器件	应用手册
SBOA170B	“集成电流感测电阻”
SBOA167A	“集成电流感应信号路径”
SBOA169A	“高精度低侧电流测量”

表 2：相关的 TI 应用手册

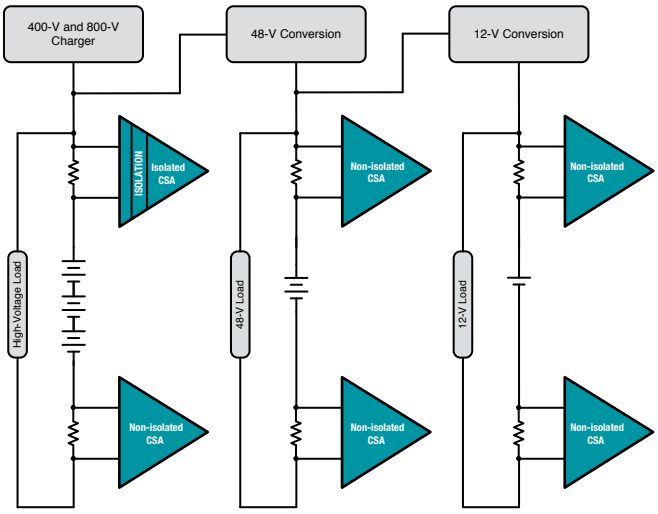
适用于 HEV 和 EV 中的 BMS 应用且基于分流器的 电流 感应解决方案

简简介介

混合动力电动汽车 (HEV) 和电动汽车 (EV) 继续在整个全球汽车市场中获得份额。这些车辆的电池管理系统 (BMS) 承担着重要的任务，即保持电池在安全工作范围 (SOA) 内运行，监测配电情况以及跟踪充电状态 (SoC)。

在典型的 HEV 和 EV 中，同时存在高电压子系统和低电压子系统。高电压子系统具有几百伏的工作电压，直接与公用电网或高电压直流电源相连。低电压子系统通常在 48V 和 12V 电压下运行。

低电压（12V 至 48V）BMS 电流感应



TI 提供了各种可用于高电压 BMS 系统的隔离式电流感应器件。这些器件包括基于磁通门技术的 DRV425。TIPD205《使用开环磁通门传感器的 ±100A 汇流条电流传感器参考设计》说明了如何实现该设计。

《HEV/EV 中基于分流器和基于霍尔传感器的隔离式电流感应解决方案比较》应用手册 中提供了其他隔离式电

流感应技术示例摘要。不过，这里的重点仅在于 12V 至 48V BMS 子系统中基于分流器的非隔离式高侧电流感应放大器 (CSA)，也称为电流分流监控器 (CSM)。

低低电电压压（(12V 至至 48V)）BMS 电电流流感感应应基于非隔离式分流器的电流感应的优点包括简单、低成本、出色的线性度和精度。另一方面，有限的共模范围可能会限制采用高侧电流感应配置的应用。

基于分流器的电流感应的另一个缺点是，在高电流水平下，分流器的功率耗散可能非常大。

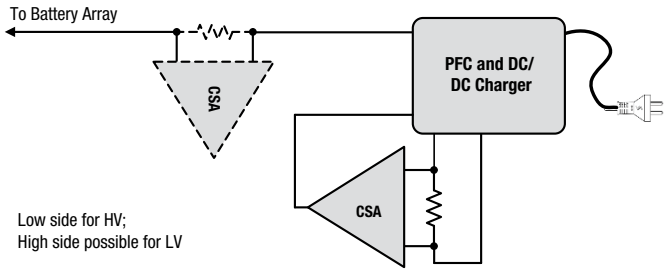


图 2. HEV 或 EV 充电器中的电流感应放大器

电池组是任何 HEV 或 EV 的重要组件。可充电电池主要有两种类型：已有 100 多年历史的铅酸电池和自 20世纪 80 年代才投入实际使用的锂离子电池。在本文档

发布时，人们正不断地付出巨大的努力进行研究，以推出新型电池，例如铝空气电池和锌空气电池。最终目标是实现下一个颠覆性电池技术（即更安全、更持久、维护更少且具有更高功率密度的电池）的商业化。就电池管理而言，铅酸电池和锂离子电池之间存在许多差异。不过，它们也有许多相似之处。两种类型都遵循特定的

恒压-恒流 (CV-CI) 充电曲线。CSA 在确保电池保持在SOA 内方面起着重要的作用。充电电流可能会很高，可能达到数百安培。过去，使用基于分流器的拓扑来测量该电流一直富有挑战性。不过，由于有了超低电阻分流器，该选项现已可行。

另一方面，BMS 系统必须在正常运行期间尽可能精确地监测配电情况，以提供总体系统运行状况和安全信息。

充电状态 (SoC) 与 HEV 或 EV 中电池组的电量计等效，与行驶里程相关。电流感应和积分是确定 SoC 的重要方法之一。即使在发动机关闭时，也并非所有车载电子设备都会完全关闭。这些关闭状态电流会导致总泄漏电流，因此强烈希望对泄漏电流进行监测并加以考虑。

理想情况下，单个电流感应放大器必须对整个电流范围（从几百安培到几安培，甚至可能到几毫安）进行监

测。在如此宽的动态范围内保持精度通常是 BMS 电流感应设计中的最大挑战之一。

确确定定分分流流电电阻阻器器的的大大小小

分流电阻器的最大电流和功率额定值通常决定了可以使用的最高分流器值。分流电阻越高，分流电压就越大，由于系统非理想因素（例如放大器失调电压、增益误差和漂移）而导致的相对误差也越小。不过，分流电压越高，功率耗散就越大。过多的功率耗散会导致温度升高，这不仅会降低系统性能，而且可能会在控制不当时造成破坏性影响。另一方面，电流感应放大器的最小电流和精度决定了最低分流器值。

例如，假设 CSA 失调电压为 10μV，而所有其他误差源均可以忽略不计，并且分流电阻为 100μΩ。如果不进行校准，则对于 100mA 电流，报告的电流可能是 0mA 至 200mA 之间的任何值。如果将分流器更改为 1mΩ，则会将相同的电流报告为 90mA 至 110mA 之间的任何值。实际上，通常将分流电阻器选择为这两个极值之间的值。

选选择择正正确确的的电电流流感感应应放放大大器器

TI 的精密非隔离式电流感应放大器在关键参数（例如共模电压、带宽、失调电压、漂移和功耗）方面提供了广泛的选择。在宽动态范围内精确地感应电流是一个巨大的挑战。该问题在低端尤为严重，因为此时系统误差很容易淹没有用的信号。为了能够从测量中减去系统误差，必须进行系统校准。

零漂移电流感应放大器可实现单点校准，并通过在整个温度范围内提供稳定的性能使该具有挑战性的设计成为可能。

由于其 80V 共模规格，INA240-Q1 成为 48V 系统的绝佳选择。INA226-Q1 是一款专为高达 36V 的共模电压设计的数字输出电流感应放大器。

该器件在同一个芯片内集成了高性能 ADC，从而提供出色的 10µV 最大失调电压规格。这两款器件都采用 TI 专有零漂移 技术进行制造，从而使单点温度校准成为可能。

主主要要规规格格	INA240A1	INA226
输出	模拟输出	12C
最大VCM	80 V	36 V
最小 VCM	–4 V	0 V
电源电压 (VS)	2.7 V 至 5.5 V	2.7 V 至 5.5 V
分流电压 (VS= 5V)	±125 mV	±81.975 mV
12V 时的 VOS	±25 µV,= (最大值)	±10 µV（最大值）
VOS 漂移	0.25 xV/°C	0.1 xV/°C
增益误差	0.20%	0.10%
噪声密度	40 nV/√Hz	不适用

汽车数字输出 CSA 建议

除 INA226-Q1 之外，TI 还提供其他数字输出电流、电压和功率监控器。表 2 和表 3 汇总了一些示例产品和相关技术文档。

器件	数数字字接接口口	说说明明
INA220-Q1	I2C, SMBUS	26V、双向、零漂移、低侧或高侧、I2C 电流/功率监控器
INA3221-Q1	I2C, SMBUS	26V、三通道、双向、零漂移、低侧或高 侧、I2C、具有警报功能的电流和电压监控器

表 2. 备选器件建议

文献编号	文献标题
SBAA325	《在 HEV/EV 低电压 BMS 子系统中使用 INA226-Q1进行电流感应》
SBOA295	《采用电流输出电流感应放大器的高电压、高侧浮动电流感应电路》

表 3. 相关技术手册

结论论

对于 HEV 和 EV 低电压 BMS 子系统中的电流感应，除低侧之外，基于高侧分流器的解决方案也是可行的选择。零漂移 技术可实现一次性校准，从而使低电流测量成为可能。数字输出设备可以利用现有的通信总线进一

步简化设计。

多通道电流监测的常见用途

随着对系统智能和功效的需求不断增长，对更佳的重要系统电流监测的需求也变得越来越强烈。

在过去，配置为差分放大器的多个运算放大器或分布在系统中的多个电流监测放大器可能会执行此类监测。但随着电流监测通道数的增加，实现解决方案所需的外部组件的数量也在增加。这些额外的组件增加了设计复杂性和解决方案尺寸，并且可能降低整体电流监测精度。

例如，考虑一个需要测量两个电流的情况，如图 1 所示。

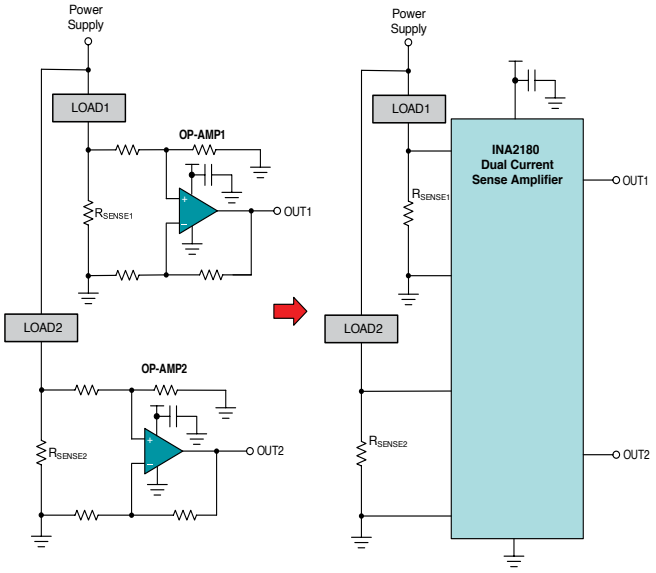


图 1：分立式与集成式电流检测解决方案

在这种情况下，基于运算放大器的解决方案需要使用八个电阻器（用于设置增益）、两个旁路电容器和两个电流检测电阻器。使用 INA2180 实现的相同电路仅需要两个电流检测电阻器和单个旁路

能量谐振造成的。由于集成式增益设置电阻器匹配良好，因此 INA2180 解决方案的精度远高于具有成本效益的分立式实现。集成式增益设置电阻器

可实现精度更高的监测，或允许使用容差更宽的电流检测电阻器，以实现低成本应用。INA2180 和 INA2181 系列也更灵活，因为它们可以监测电压高于电源电压的电阻器上的压降。

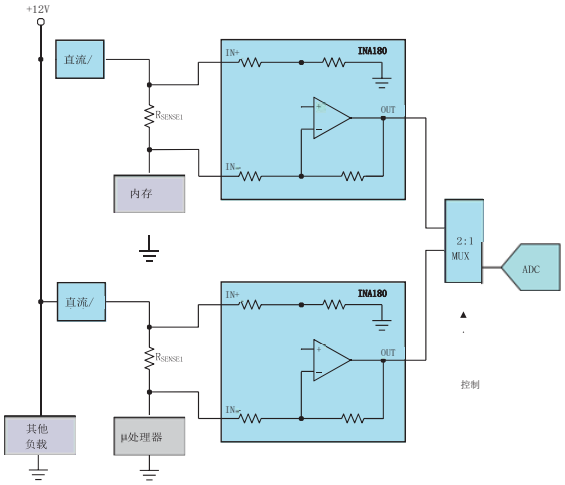


图 2：监控两个电源轨中的总电流

除了简化设计流程和减少外部组件数量之外，在单个封装中使用多个电流监测器件可实现多种常见的应用解决方案。

例如，考虑图 2 所示的应用，其中外部模数转换器 (ADC) 监测存储器和处理器消耗的总电流。

一种方法是监测中央处理器 (CPU) 和存储器电流，将电流多路复用到 ADC，然后在微处理器中

将结果值加在一起。这种方法需要一些数学处理（以及 ADC），从而以足够快的速率连续对输出进行采样，以使其有效。更好的方法是使用 INA2181 的 REF 引脚将存储器消耗的电流与 CPU 消耗的电流相加。您可以通过将通道 1（用于监测存储器电流）的输出连接到 REF2 来实现这一点，如图 3 所示。

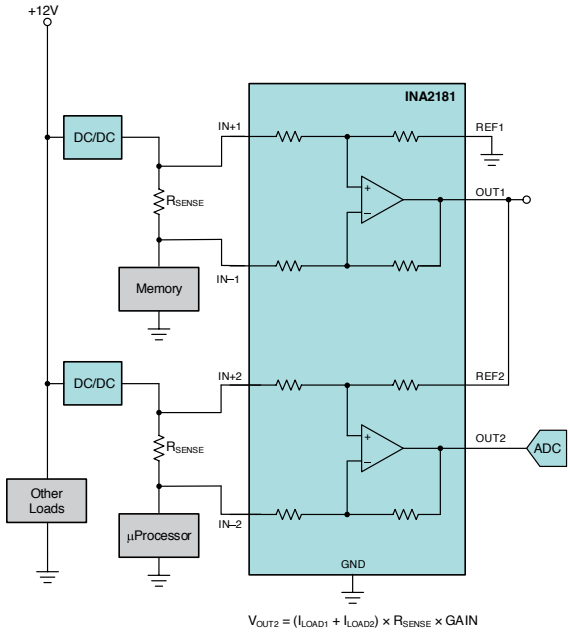


图 3：使用 INA2181 对模拟电流进行求和

通道 2 的输出将是来自 CPU 和存储器的电流的放大总和。ADC 可以监测来自存储器的电流和总电流。但由于通道 2 的输出是模拟信号，因此具有适当设置参考值的比较器可在发生过流情况时中断系统。为使该电路正常工作，两个检测电阻器的值必须相同。

多通道电流监视器的另一个方便用途是检测意外的泄漏路径。这些泄漏路径可能是由意外的接地短路或其他一些不在电流测量路径中的电势导致的。检测漏电流路径的一种技术是监测进出电路的所有电流。只要不存在意外的泄漏路径，流进负载的

电流就一定等于流出的电流。

如果进入电流相等，则不会检测到意外的电流泄漏路径。

使用双电流监视器提供了一种用于检测漏电流路径的简单技术，无需使用多个器件，也不必从外部添加或减去电流。图 4 中显示的电路使用 INA2181 来监测流进和流出负载的电流。通过反转第二个放大器的电阻器连接的极性并将第一个放大器的输出连接到第二放大器，可以从流出负载的电流中减去流进的电流。

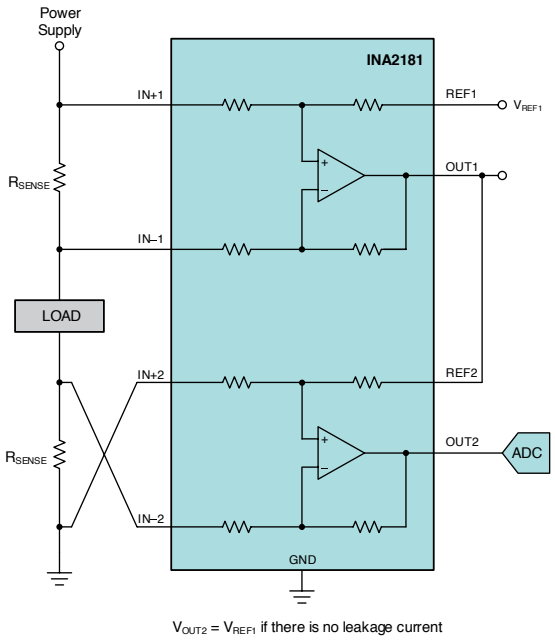


图 4：使用 INA2181 进行电流消减以实现漏电流检测

器件	经优化的参数	性能折衷
INA4180	四通道模拟电流监视器	单向测量，较大的封装
INA4181	双向四通道电流监视器	较大的封装
INA3221	三通道数字分流/电压监视器	无模拟输出

表 1：备选器件建议

器件	应用手册
SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”
SBOA169A	“高精度低侧电流测量”
SBOA190	“低侧电流感应电路集成”

表 2：相关的 TI 应用手册

使用数字电流传感器进行功耗和能耗监测

随着对高能效系统的需求不断增长，精确监测系统功耗和能耗变得越来越重要，而这也是越来越多的工程师必须解决的问题。该问题的一种解决方案是对电流和电压均使用模数转换器 (ADC)，然后在处理器中对结果做乘法以获得功耗。不过，获取电流和电压信息之间的通信延迟和开销会在功耗测量中引入时间对准误差，因为电流和电压都可能彼此独立地变化。

为了尽可能减小电压和电流测量之间的延迟，处理器需要为 ADC 通信和功耗计算提供足够的处理能力。即使具有主要用于此功能的处理器，与系统中其他器件的任何交互也可能延迟电压和电流测量并降低功耗监测精度。增加额外的职责（如计算平均系统电压、电流和功耗以及进行能耗监测）将进一步加重处理器执行额外功能的负担。

一种更好的功耗监测方法是使用数字电流监视器来执行数学处理，将处理器解放出来处理其他系统任务，仅在需要进行更高级别的系统操作时通知处理器。TI 提供广泛的数字功耗和电流监视器来解决该问题。一款此类器件是 INA233，它可以通过与 I2C、系统管理总线 (SMBus)、电源管理总线 (PMBus) 兼容的接口来监测电压、电流、功耗和能耗。图 1 是 INA233 的方框图。

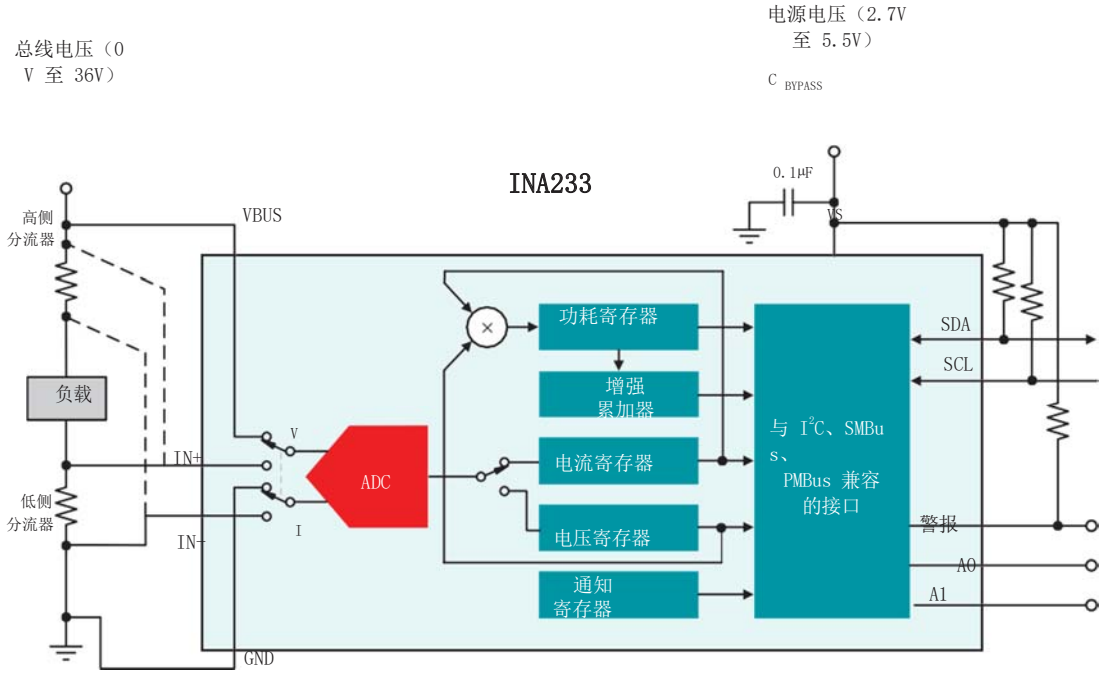


图 1：INA233 典型应用电路

图 2 是电源转换引擎的简化方框图。在该图中，在内部以交错方式通过分流电压和总线电压测量值计算功耗，从而最大限度地减小功耗计算中的时间对准误差。

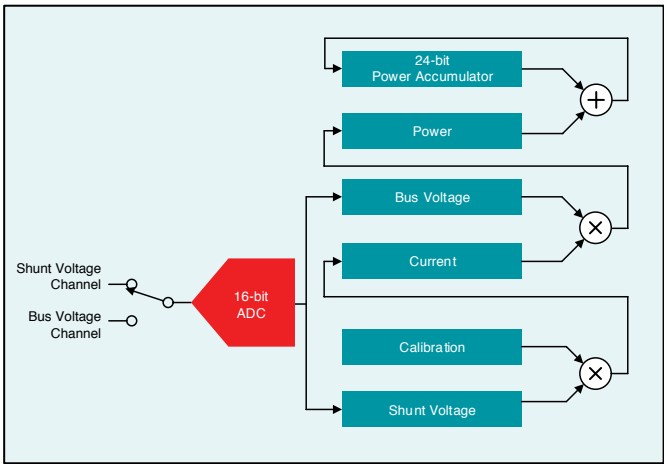


图 2：INA233 电源转换引擎

内部功耗计算在后台执行，不影响 ADC 转换速率或数字总线通信。该器件还具有一个 ALERT 引脚，它会在电流、功耗或总线电压超出预期工作范围时通知主机处理器。INA233 会独立处理故障事件；在 ALERT 引脚有效时读取内部状态寄存器可以报告多个同时存在的故障情况。INA233 的内部处理和通知功能可将主机处理器解放出来管理其他任务，同时该器件会

持续监测系统。仅当需要额外的关注时，才会通过 ALERT 引脚通知主机处理器。

INA233 还具有一个 24 位的功耗累加器，它会将当前的功耗读数

与先前的功耗读数之和相加。该功耗累加器可监测系统能耗，从而得到随时间推移的平均功耗测量值。由于功耗水平可能在任何给定时刻波动，因此通过能耗监测可以更好地衡量长时间范围内的平均系统

功耗。了解系统能耗还可以衡量系统运行时间和功效，以及涉及电源电压和处理器时钟频率调节的功耗优化的效果。

用于分流电压和总线电压测量的 ADC 转换时间可编程为介于 140µs 和 8.244ms 之间。较长的转换时间有助于降低噪声敏感性和提高

器件测量的稳定性。图 3 显示了增加 ADC 转换时间的效果。

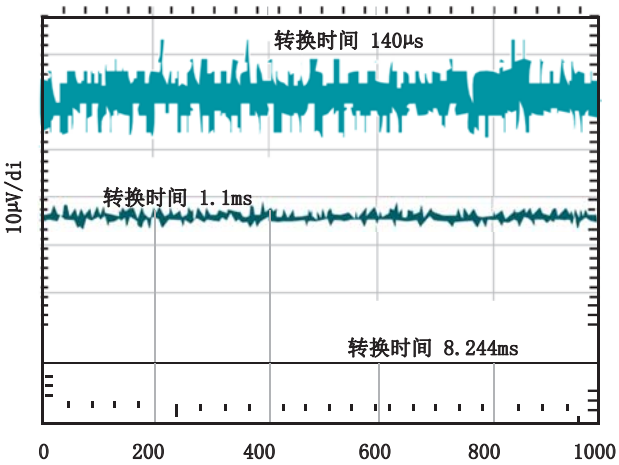


图 3：噪声与 ADC 转换时间的关系

除了可编程的 ADC 转换时间之外，该器件可对多达 1,024 个转换周期计算平均值，并在平均值计算完成后更新内部功耗、电流和电压寄存器。通过可编程转换时间以及平均值计算窗口，可以调节器件遥测更新速率以满足系统时序需求。

尽管 INA233 具有内置的平均值计算和可调节的 ADC 转换时间，但您必须等待平均值计算完成后才能读取结果。内部功耗累加器的一个好处是使主机能够按需计算平均

功耗，从而消除等待平均值计算时间间隔结束的延迟。

通过获取总累加功耗值并除以该累加周期的

总样本数，可按需获得平均功耗读数，如公式 1 所示：

$$\text{平均功耗} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \text{ADC 功耗测量值}_i}{n}$$

$$= \frac{\text{n 个样本的总累加功耗}}{\text{样本数}}$$

计算出平均功耗之后，可以通过将平均功耗乘以该平均值的时间间隔或通过将总累加功耗乘以 ADC 转换时间来确定能耗，如公式 2 所示：

$$\text{能耗} = \text{平均功耗} \times \text{时间}$$

$$= \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \text{ADC 功耗测量值}_i \quad i}{n} \right) \times (\text{n} \times \text{ADC 转换时间})$$

$$= \text{总累加功耗} \times \text{ADC 转换时间}$$

由于 ADC 转换时间可以变化高达 10%，因此最好用平均功耗乘以

使用外部时间基准测出的时间。能耗计算的时间间隔应该足够长，从而使数字总线产生的通信时间

对于能耗计算中使用的总时间而言

无关紧要。INA233 中的功耗累加器的

大小限制在 24 位。主机应定期读取累加器的值并将其清除以避免溢出。还可以将累加器配置为在每次读取后自动清除。

溢出的时间将是功耗、ADC 转换时间和平均时间的函数。相对于较低的功耗水平，较高的功耗水平将导致功耗累加器更快发生溢出。此外，较长的转换时间和更高的平均数将

延长溢出的时间；在较低功耗的情况下，
溢出的时间可以延长至几个小时，

甚至长达几天。

INA233 是 TI 提供的诸多数字电流监视器之一。表 1 显示了一些还可以监测系统并有助于将主机处理器解放出来处理更高级别任务的替代器件。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA226	与 I2C/SMBus 兼容，寄存器组更小	无功耗累加器，无独立故障监控功能
INA231	晶圆芯片级封装 (WCSP)，寄存器组更小，成本更低	精度更低，无功耗累加器，无独立故障监控功能
INA219	成本更低、寄存器组更小	精度和分辨率更低，无 ALERT 引脚，无功耗累加器
INA3221	监测三个通道	更低精度和分辨率、监测总线电压和分流电压

表 1：备选器件建议

SBOA179	“集成式电流感应模数转换器”

表 2：相关的 TI 应用手册

汽车模块中的 12V 电池监控

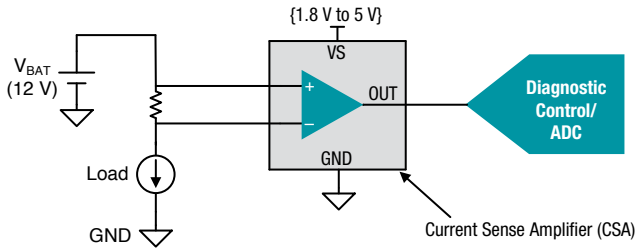
通过监测汽车 12V 电池的电流，可以为各种应用提供关

键 数据，例如模块电流消耗、负载诊断和负载反馈控

制。TI 电流感应产品系列可以通过符合汽车标准的模拟和数字电流感应放大器 (CSA) 器件来满足这一领域的要求，这些器件具有集成 功能，并且即使在使用低电压轨

供电的情况下也可以在 12V 环境中工作。本文档提供了建议的器件和架构，以解决该领域中的电流感应问题。

图 1. 由 12V 电源轨供电的电流感应放大器



该领域中存在一些由电气瞬态保护法规 ISO7637-2 和ISO16750-2、跨接启动、反极性和冷启动等条件导致的限制。通常，系统级保护和抑制方案可用于保护下游电路免受这些电压浪涌情况的影响。这些解决方案中包含的器件类型为智能高侧开关、智能二极管或其他分立式实施。这些产品可能具有内部集成电流感应 功能，但它

们通常不是很精确（最大误差为 ±3% 至 ±20%），并且动态范围有限。

内，在汽车环境中也具有很高的精度（误差小

于 1%）。

与分立式解决方案或具有补充集成电流感应功能的 IC相比，匹配的内部增益网络和输入失调电压归零功能可在整个温度范围内提供较低的测量漂移。利用该放大器集成和技术，无需进行温度和系统校准，一切都可以通过低成本来实现。

通常，一般的系统保护方案无法完全抑制或防止电压浪涌，因此这些主要法规会转化为典型的电压承受能力要求。根据系统情况，电流传感器可能需要承受负载突降、电池反向保护、快速负载开关和电感反冲电压。例

如，在负载突降条件下，使用 12V 电池电源轨需要至少40V 的承受能力。务必选择具有符合系统最坏情况 VCM条件的输入共模电压 (VCM) 额定值的电流传感器。否则，在这些情况下需要使用输入电压钳位方案来保护器

件。

有多种可由 12V 汽车电池供电并能承受高达 40V 及更高临界电压水平的 TI 电流（功率）感应放大器。最终，它们提供了非常精确的零漂移、高带宽和低成本解决方

案。表 1 利用在线 TI 产品选择工具，列出了由汽车12V 电池电源轨供电且需要 40V 承受能力的高侧电流感应的备选器件。应注意，表 1 中的所有器件都具有多个20V/V 至 500V/V 的增益变体。

TI 电流感应放大器	VCM 承受能力	VOS_MAX (25 °C)	BW	增益误差最大值 (25°C)	IQ_MAX (25 °C)	特性
INA240-Q1	-6 V 至 +90 V	±25 µV	400 kHz	±0.2%	2.4 mA	PWM 抑制（极高的 CMRR）、AEC Q100（温度等级 1 和 0）
INA190-Q1	-0.3 V 至 +42 V	±10 µV	45 kHz	±0.3%	65 µA	INA186-Q1 的更精确版本。宽动态范围。
INA186-Q1	-0.3 V 至 +42 V	±50 µV	45 kHz	±1%	65 µA	低输入偏置电流（IB = ±500pA 典型值）。宽动态范围。工作电源电压 (VS) 为 1.7V。
INA180-Q1 (INA181-Q1)	-0.3 V 至 +28 V	±500 µV	350 kHz	±1%	0.5 mA	单通道、双通道和四通道。单向或双向版本

表 1. 用于监控 12V 汽车电池的电流感应放大器

根据表 1，与 INA186-Q1 相比，INA240-Q1 提供了最佳的性能，但并没有针对监控 12V 电池进行优化，而INA186-Q1 则需要更低的功耗和成本以及更小的封装尺寸。INA186-Q1 确实具有高交流 CMRR (140dB) 和大动态范围（在整个温度范围内具有 VOUT 至 VS - 40mV的范围）。此外，INA186-Q1 具有独特的容性耦合输入架构，与大多数 CSA 相比，其差分输入电阻增加了 3个数量级。凭借高输入阻抗，用户能够在对增益的影响极小的情况下过滤器件输入端的电流噪声。使用数据表公式，如果 R1 = 1kΩ，则对于除 A1 (25V/V) 之外的所有变体，有效增益降低 43.5m%。图 2 显示了 INA186-Q1 在电池监控中的使用。在输入端（而不是输出端）进行滤波意味着电流噪声不会被放大，并且 INA186-Q1可以将更干净的信号驱动到 ADC 中，而无需在 ADC 之后加载输出滤波器。

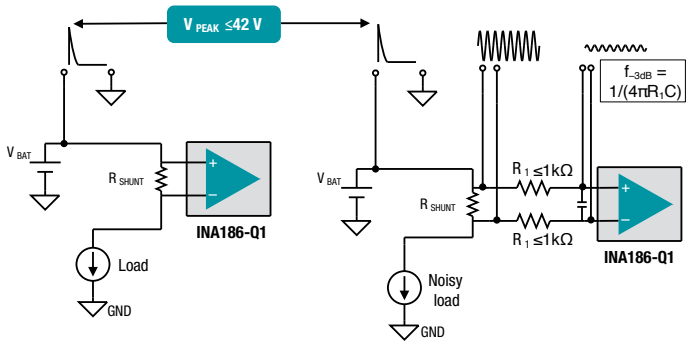


图 2. 由 12V 电池供电且带/不带噪声过滤的 INA186-Q1

凭借广泛的电流感应产品系列，用户能够在采用常见的输入保护方案时对折衷进行优化。如果所选的器件指示绝对最大共模电压额定值不能超过您的最大预期电压浪涌，则器件需要输入保护。除一些无源器件以外，电流传感器还需要在输入端提供瞬态电压抑制 (TVS) 或齐纳二极管以实现保护。图 3 显示了使用成本优化型电流传感器 INA181-Q1 的示例。

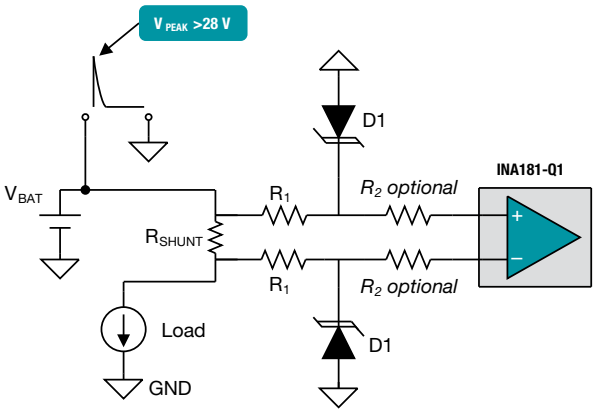


图 3. 针对 VCM > 28V 提供输入保护的 INA181-Q1

在图 3 中，二极管 D1 将器件的输入 VCM 钳位到 28V以下，该电压是 INA181-Q1 的绝对最大电压。R2 是可选的，可以包含该组件以防止 D1 和 CSA 的内部 ESD结构同时打开，但通常不需要该组件。如果需要 R2，则该组件应小于 R1。二极管的额定功率取决于预期电压上升最大值，但更重要的是取决于开通电流。可以通过增

加 R1 电阻来减小二极管电流，但这会降低电路的有效增益，更关键的是，对于大多数电流传感器（INA186-Q1 除外），这会使增益误差方差增大。

在给定 INA181-Q1 的内部电阻器增益网络和输入差分电阻的情况下，工程师可以使用数据表中的公式通过 R1计算有效电路增益。请记住，添加外部电阻器会使系统增益误差方差超出数据表的限制。这是由于以下事

实：INA181-Q1 内部电阻器是按比例匹配的，但并未调整为其典型值，因此其绝对值可能相差 ±20%。

总体而言，工程师可以选择 INA181-Q1，因为采用输入保护情况下的总成本较低，并且增益误差变化的增加是

可以接受的；不过，具有更高额定 VCM 的器件是更简单的解决方案，能够以更低的复杂性和更少的组件在整个

温度范围内提供精确的电流感应。

备选器件建议

请参阅表 2，以了解 需要 较大 VCM 范围或 集成 功能（如分流电阻器或比较器）的应用。

器件	优化参数	性能折衷
INA253	集成的 2mΩ 分流电阻器（包含在增益误差规格中）。增强型 PWM 抑制	IQ
INA301-Q1	BW 和压摆率。具有可调阈值和 1µs 警报响应时间的内部比较器	40V VCM 最大值
INA302-Q1，INA303-Q1	BW 和压摆率。具有可调阈值和 1µs 警报响应时间的双路比较器输出	40V VCM 最大值
LMP8278Q-Q1	-12V 至 +50V VCM 承受能力。可调增益和滤波。缓冲输出	VOS
INA1x8-Q1，INA1x9-Q1	≥60VCM。电流输出（可调增益）。经调整的输入电阻器。关断后具有低 IB	VOS

表 2. 备选器件建议

TIDA-00302	《电流分流监控器的瞬态稳定性》
SBOA162	《测量电流以检测超出范围的情况》
SBOA165	《高压电源轨上的精密电流测量》
SBOA167	《集成电流感应信号路径》
SBAA324	《适用于 HEV 和 EV 中的 BMS 应用且基于分流器的 电流 感应解决方案》

表 3. 相关技术文档

简化电池测试设备中的电压和电流测量

在向客户发货之前，电池测试设备验证电池组的功能和性能。电池测试仪执行三种主要的功能测试：

- 电池化成和分容。在组装电池单元或电池组之后，每个单元必须经历至少一个完全受控的充电或放电循环，以初始化该设备并将其转换为正常工作的储电设备。电池

  供应商还使用这种方法对电池单元进行分容，这是根据目标规格将电池分成不同性能组的过程。如需更深入地了解电池初始化电路，请参阅双向电池 初始化系统电源板参考设计。
- 环路和特性测试。环路和特性测试是指通过重复充电和放电序列来循环运行电池或电池组。这可以验证电池的特征寿命和可靠性参数是否处于规定的容差范围内。
- 功能测试。功能测试验证电池组在发货前是否正常运行，并确保每个电池和电池组正常工作。

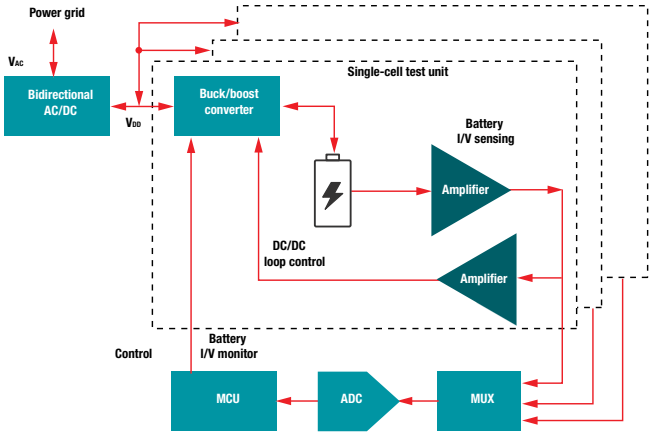


图 1：传统电池测试设备方框图

在典型系统中，降压转换器用作电池充电的电源，升压转换器用于电池放电。传统运算放大器和仪表放大器 (INA) 都在反馈环路中

用于控制电压和电流的充电和放电。

为了给电池充电，降压转换器应启用，而第一级电压运算放大器和电流检测 INA 测量电池电压和电池或电池组的充电电流。这些经调节的信号分别用作电压回路或

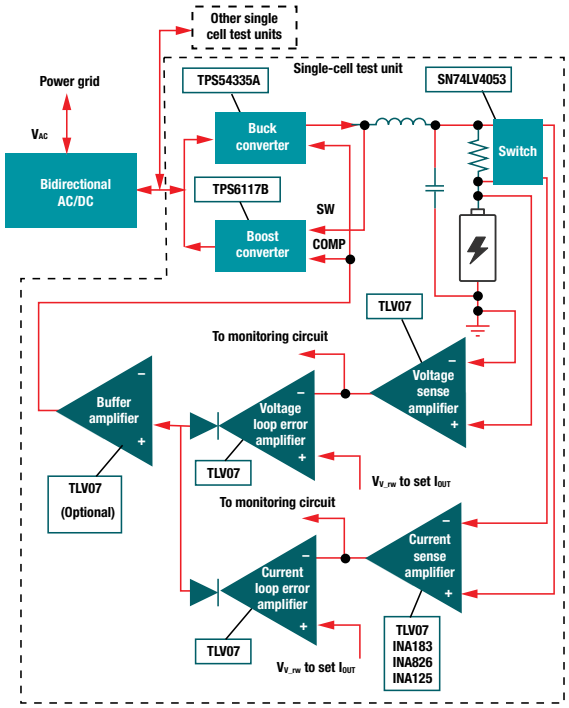
电流回路的第二级误差运算放大器的输入。

每个误差运算放大器的增益输出用作第三级缓冲运算放大器的输入。缓冲

运算放大器的输出馈送到降压转换器的反馈引脚中，以控制输出电压或电流。根据输出电流要求，可以通过多种方式来实现降压/升压功能；不过有两种方法是最常见的。

对于更高电流要求，您可以使用集成式充电控制器和外部场效应晶体管 (FET)。但是，对于成本敏感型系统中常见的低电流要求，您可以通过离散方式实现此功能，如图 2 所示。

只需调整误差运算放大器正输入引脚上的 VV_ref 和 VI_ref，即可将降压转换器的目标输出电压和电流调整到最佳值。在典型的电池充电应用中，电流环路误差运算放大器的输出电压开始为高电平，使降压转换器进入恒流输出模式。



2：电池测试设备典型放大器配置

在下一个相位中，电压环路误差放大器的输出电压变高，从而使降压转换器进入恒压输出模式。电池放电时，禁用升压转换器。运算放大器控制电池放电电流和电压，其工作原理与电池充电时相同。升压转换器将电池电压提升至 VDC，该电压通常为 12V。

典型的系统要求为：

经调节的电流误差 ERR IOUT = 0.1%。

经调节的电压误差 ERR VOUT = 0.5%。

为了满足这些要求，您需要一个具有低失调电压 (VOS)、低 VOS 温度漂移和高共模抑制比 (CMRR) 的运算放大器，如 TLV07。

运算放大器与功率级形成一个闭环。误差运算放大器的反相输入端上的电压将非常接近基准电压 VV_ref 和 VI_ref，从而最大限度地减小了大环路增益产生的误差。由于主要误差来自电压和电流检测放大器，因此选

例如，如果所需的经调节的输出电流目标 ISET 为 10 A，并且电流检测电阻器 RSENSE 为 20mΩ，则放大器的输入误差如公式 1 所示：

$$V_{I_ERR_RTI} < ERR_{I_{OUT}} \times I_{SET} \times R_{SENSE} = 200\ \mu V$$

如果所需的经调节的输出电压设置为 VSET 4.2V，则放大器的输入误差如公式 2 所示：

$$V_{V_ERR_RTI} < ERR_{V_{OUT}} \times V_{SET} = 21\ mV$$

假设温度从 25°C 升至 85°C 且电池电压为 4V，那么您可以轻松计算低失调电压和低失调电压温漂运算放大器（如 TLV07）产生的实际误差，如公式 3 所示。

$$V_{TLV07_ERR_RTI} = V_{OS_max} + dV_{OS} / dT_{max} \times 60\,^{\circ}C + 4\ V / CMRR_{DC}$$
$$= 100\ \mu V + 0.9\ \mu V / {}^{\circ}C \times 60\,^{\circ}C + 4\ V / 158489$$
$$= 154\ \mu V < V_{I_ERR_RTI} \text{ and } V_{V_ERR_RTI}$$

择精密放大器非常重要。

在下一个示例中，我们使用的 INA 集成了所有反馈电阻器，提供 VOS_max = 150μV、dVOS/dTmax = 0.5μV/°C，

非常适合在具有简化设计的系统中执行电流分流放大器功能。

如果系统需要更高的性能规格，则可以将电流和电压误差分别更改为 0.05% 和 0.1%。在这种情况下，您可以使用零漂移 INA188 等精密 INA。假设条件与第一个示例相同，温升为 60°C，VBAT 为 4V，

那么 INA188 的实际误差为：

- VI_ERR_RTI = 67μV。
- VV_ERR_RTI ≤ 4.2mV。

通过查看图 3，您可以看到是电流检测电阻器导致了 I+ 和 I- 贡献。B+ 和 B- 分量来自电池的正负端子。

由于实际的电池电压可能高于 5V，因此典型的运算放大器电源为 12V。TLV07、INA188 和 INA125 都具有 36V 的最大 (±18V) 电源电压，符合系统要求。

由于在充电和放电周期中电池电流可能接近于零，因此在第一级电流检测运算放大器中实现双极电源可避免削减电流检测信号。会分别使用 R12、C3 和 C4 以及 R6、C1 和 C2 对误差运算放大器的每个级应用 III 型补偿。为确保环路稳定性，您应根据实际电源设计对这些值进行微调。

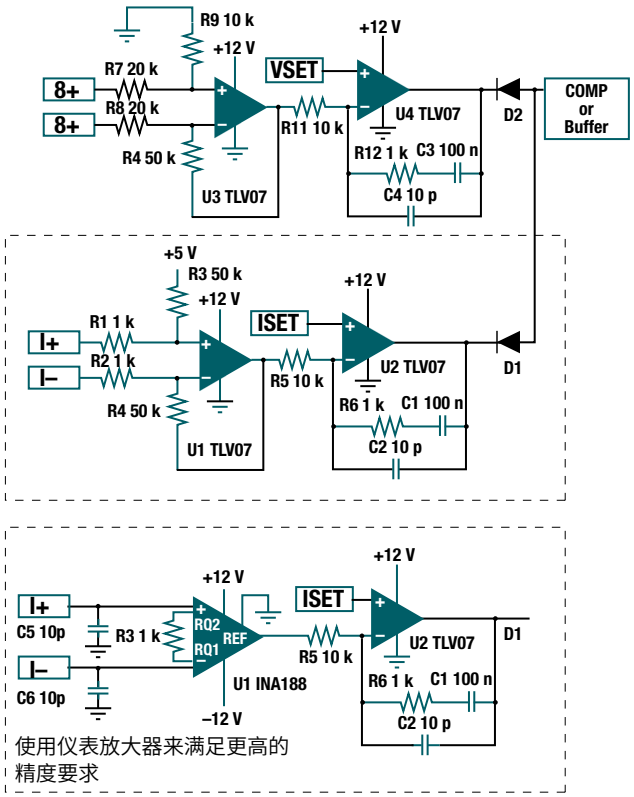


图 3：高端应用中采用 TLV07 和 INA188 的电压和电流检测电路

电压和电流检测是电池测试设备系统中最重要的两项测量。该应用最重要的器件规格是具有低失调电压和漂移的器件。

这些参数对于确保高性能检测而言至关重要，同时最大限度地减少了对系统误差的第一级贡献。

器件	系统优势
TLV07	低失调电压和低漂移可为成本敏感型系统提供足够的调节电流和电压误差
INA125	最低 100dB 的高 CMRR 可增加输出的动态范围；低失调电压和低漂移可降低对昂贵且耗时校准的需求
INA188	低失调电压和零漂移可提供较低的调节电流和电压误差，而高 CMRR（最低 104dB）可降低共模干扰

第 2 章:超出范围电流测量

测量电流以检测超出范围的情况

流经系统的电流量反映了系统的运行效率。了解系统运行情况的一个基本切入点是将从电源拉取的电流与该特定运行条件下的预定义目标范围进行比较。如果电流超出预期水平,表示系统中存在耗电量超出预期的元件。

同理,如果电流低于预期,则可能表示系统某部分的供电情况异常或者甚至处于断电状态。

可以通过多种方法来诊断系统中的故障情况,具体取决于超出范围指示的预期用途。一种方法是监测整个系统的电流消耗,以确定电源中潜在的破坏性偏移。在这种情况下,测量精度一般并不重要,仅需简易警报指示发生超限。

通常使用熔断器来提供短路保护,防止系统流入破坏性电流。在发生超出范围情况时,熔断器会熔断,从而断开电路。此时,必须更换熔断器才能确保系统重新正常运行。在最坏的情况下,如果难以获取熔断器,则需要将系统交付至修理厂。

熔断器响应特定电流阈值的效率受限于时间 - 电流相关性。图 1 显示了熔断器的示例时间-电流响应。

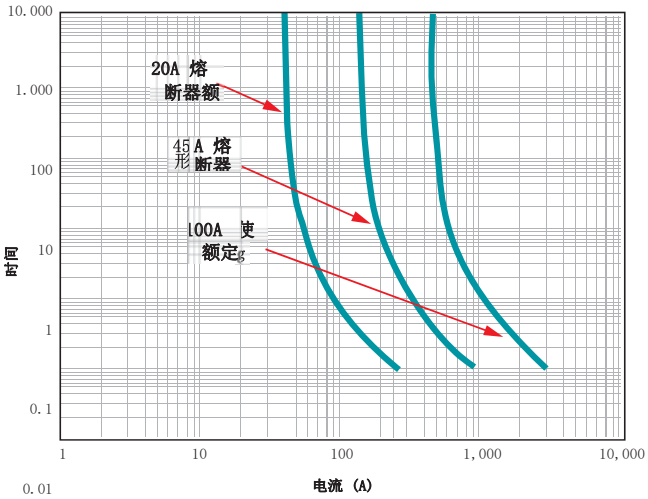


图 1:典型的时间-电流熔断器曲线

在另一种过流保护方案中,系统会在检测到偏移时对其自身进行保护,但在故障条件被清除后立即恢复正常运行。这种保护方法使用比较器

将监测的工作电流水平与定义的阈值进行比较,寻找超出范围的情况。为特定应用创建必要的检测级别依赖于特定于系统的变量,如所需超出范围阈值的可调节性、阈值水平中可接受的裕度以及必须以多快的速度检测出偏移。

INA381 是一款专用电流检测放大器,具有集成的独立比较器,能够

执行与超出范围检测所需的预期工作阈值的基本比较。

图 2 显示了 INA381 测量电流检测电阻器上产生的差分电压以及与用户可调节的阈值水平进行比较的情形。

超出阈值水平后,警报输出会拉低。INA381 的警报

响应能够快至在 10µs 后跟踪电流偏移。

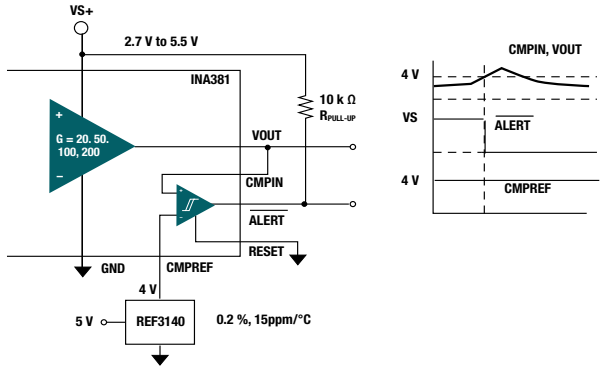


图 2：INA381 过流比较器

除故障指示外，可能还需要提供有关电源实际拉取的电流大小或特定负载的信息。对于这些要求，典型的方法是使用电流检测放大器和独立比较器的组合，如图 3 所示。

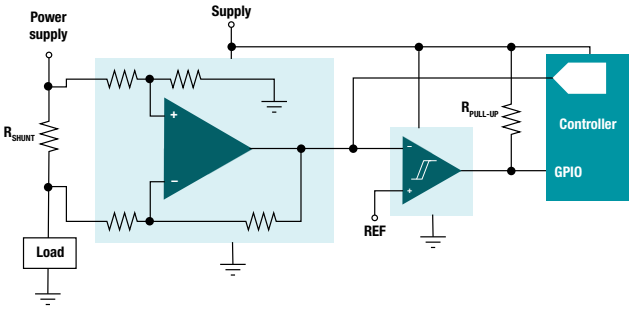


图 3: 分立式过流检测

电流检测放大器测量检测电阻器上产生的差分电压并将输出发送至比较器输入和模数转换器 (ADC)。

INA301 在一个器件中结合了电流检测放大器（提供与测量的输入电流成比例的电压输出信号）和板载比较器（用于过流检测），如图 4 所示。

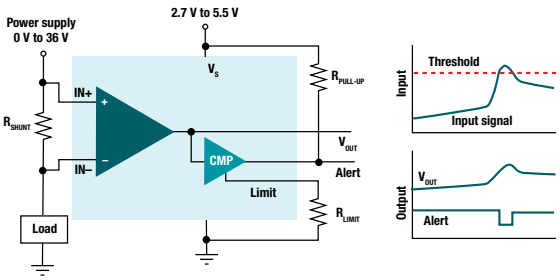


图 4：INA301 集成过流检测

借助电流信息和超出范围指示器，系统可根据运行情况使用多种监测和保护机制。INA301 使用的一种机制是首先仅监测警报指示器，将其用作故障指示器。在检测到超出范围情况并且警报

引脚置位后，系统立即开始主动监测模拟输出电压信号，从而允许系统相应地做出响应。系统响应通常是降低系统性能水平、完全关闭或继续监测以确定偏移是否会成为更严重的问题。

凭借成正比的输出电压和板载过流检测功能，系统能够仅在必要时主动监测电流信息，从而优化系统资源。

INA301 放大器在固定增益 100（增益也可以是 20 或 50）下具有 450kHz 的小信号带宽和

35µV 的最高输入失调电压。除最大增益误差规格 0.2% 之外，放大器还能快速检测超出范围情况。INA301 能够实现精确的输入测量并快速响应过流

事件，响应时间小于 1µs，其中包括输入信号测量、与用户选择的警报阈值进行的比较以及比较器输出的置位。

备选器件建议

对于需要通过板载过电流检测来监测高于 INA301 36V 范围的电压轨上电流的应用，

应使用 INA200。

INA180 是一款常用于使用外部

比较器的分立过流检测电路的电流检测放大器。

对于需要监测第二个故障阈值水平的应用，INA302 采用一个具有专用可调节阈值水平的附加超出范围比较器。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA180	封装:SC70-5、小外形晶体管 (SOT) 23-5	带宽更小,仅提供模拟输出
INA200	共模电压范围: -16 V 至 +80 V	精度降低
INA302	两个独立的警报比较器	更大的封装:薄型小外形尺寸封装 (TSSOP)-14

表 1:备选器件建议

SBOA161B	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”
SBOA163A	“高侧电机电流监控可提供过流保护”
SBOA167A	“集成电流感应信号路径”
SBOA168B	“监测电流以识别多种超限条件”
SBOA193	“使用电流感应放大器的 PLC 系统中分立式数字输出的安全和保护”

表 2:相关的 TI 应用手册

监测电流以识别多种超出范围的情况

在确定印刷电路板 (PCB) 设计是否正常运行时,首先需要查看的参数之一是工作电流。通过检查工作电流,您可以立即判断电路板上是否有器件短路,是否有任何器件

损坏或(在某些情况下)软件是否按预期运行。传统方法是使用电流检测放大器和模数转换器 (ADC) 来监测电流是否发生超出范围的情况,该方法无法提供所需的警报响应时间。此外,使用 ADC 来监测过流警报阈值需要在 ADC 和主机处理器之间持续进行通信,这会不必要地增加系统负担。

为了实现识别电流超出范围情况所需的响应时间,您需要使用模拟比较器来检测电流何时超出给定的参考阈值。不过,在很多情况下,仅设定一个警报级别不足以确定系统状态,也无法针对超出范围的电流作出相应的系统响应。

为了满足该要求,可以使用

图 1 中所示的电路来监测多种超出范围的电流情况。

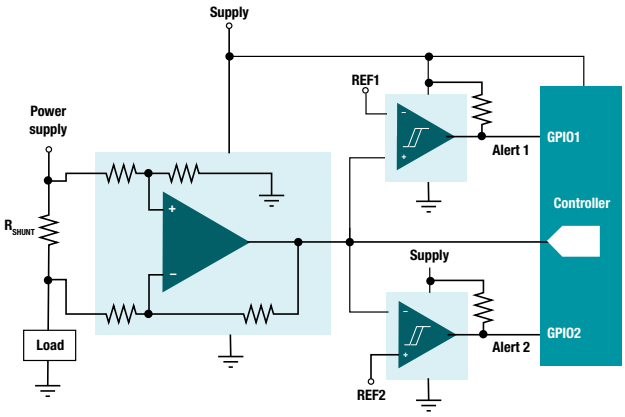


图 1:用于检测多个过流事件的离散实现

该电路包含五个器件:一个电流检测放大器、两个比较器和两个基准。图 1 所示的离散实现需要谨慎选择比较器,以获得所需的警报响应时间。如果响应过慢,系统可能没有充裕的时间来采取相应的措施;如果响应过快,可能触发错误的警报,进而可能导致系统关断。图 2 显示了一个更简单的电路,该电路可以解决离散实现中存在的设计问题。

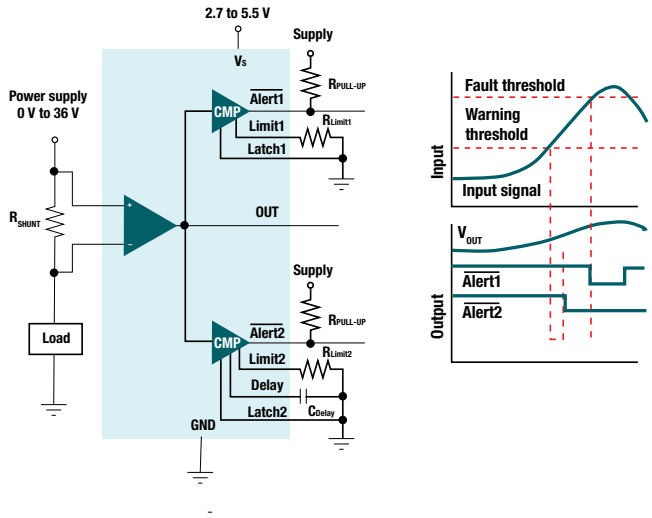


图 2：INA302 多用途过流比较器

INA302 能够检测两种超出范围条件。较低的超出范围条件称为过流警告阈值，而较高的超出范围条件称为过流故障阈值。利用过流警告阈值，可以检测电流何时开始变得过高但尚未达到可能导致系统关断的故障阈值。

当电流超出警告阈值时，

系统可以选择通过禁用子电路、控制电源电压或降低时钟频率来降低系统功耗，以降低总系统电流并防止出现故障。如果确实发生过流故障情况，必须迅速作出响应，以止发生进一步的系统损坏或

故障行为。

为了最大程度地减少组件数量并便于

使用，INA302 的警报阈值通过单个外部

电阻器进行设置。故障阈值应

设置为高于最坏情况下系统可能会消耗的电流值。电流超出该阈值后，INA302 的警报引脚会在 1µs 内作出响应。警告阈值依赖于应用，但通常高于标称工作电流。警告阈值响应时间可通过外部电容器在 3µs 至 10s 的范围内

通过适当地设置警告阈值延迟时间，可以将过流警告阈值设置为更接近最大直流工作电流，同时仍可

避免由短暂电流尖峰或噪声引起的错误跳闸。故障阈值和警告阈值之间更大的间距

为系统提供了额外的时间，以便在超过故障阈值之前采取预防措施。

某些系统允许在触发警报之前

在超出警告阈值的情况下运行一段时间。此类应用之一是监测流向处理器的电源电流。可以允许处理器在超出正常最大电流水平的情况下短暂地

运行一段时间，以最大程度地提高关键操作期间的计算吞吐量。如果电流在超过设定的延迟时超出警告阈值，警报输出将拉低，以通知主机处理器，以便在发生过热情况之前电压或时钟频率会降低。

在某些系统中，检测出电流何时过低非常有用。对于这些应用，图 3 中所示的 INA303 可提供过流和欠流检测。进行调节。

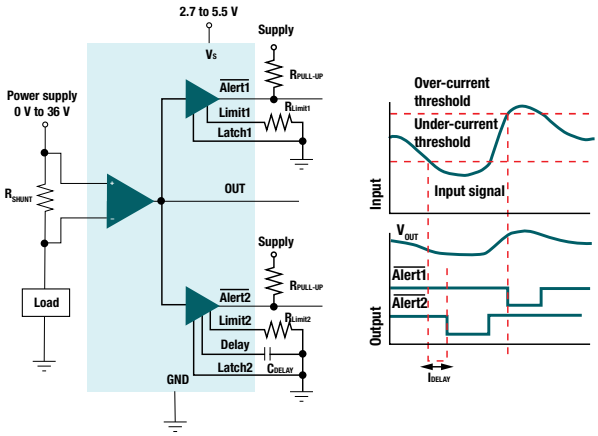


图 3：INA303 过流和欠流检测

电流超出过流故障阈值后，ALERT1 输出将在 1µs 内作出响应。不过，如果电流降至欠流阈值以下，则通过延迟电容器来设置 ALERT2 响应时间。正常运行状态下可能出现短暂欠流情况。不过，如果欠流情况的持续时间长于预期，则可能是由

损坏的器件或即将发生故障的系统导致的。在这种情况下,警报输出可向系统控制器通知这一情况,并且可以在系统发生故障之前实施故障处理程序。

欠流检测的另一个用途是确认系统状态是否正确。某些系统会进入低功耗模式,该模式下的电流低于正常工作范围。在这种情况下,欠流警报输出可以通知主机系统确实已进入关断状态。

在某些设计中,只有当电流超出预期的工作范围时才需要通知。对于这些情况,可将两路警报输出连接在一起,从而将 INA303 配置为在窗口模式下运行,如图 4 所示。在该模式下,只要电流处于正常运行窗口内,单路警报输出就处于高电平。

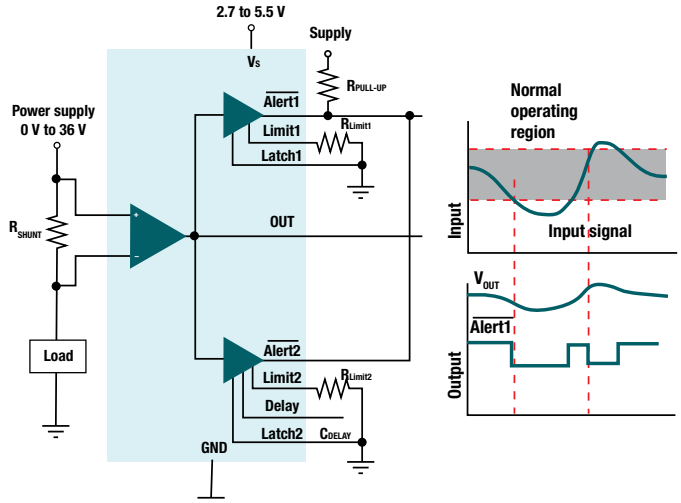


图 4: INA303 窗口模式运行

备选器件建议

INA226 可用于需要数字电流监测的应用。如果您只需要单路数字警报输出,那么 INA300 可以采用微型 2mm x 2mm 无引线四方扁平 (QFN) 封装。

对于除模拟电流信号外仅需使用单路警报输出的应用,INA301 可在 1µs 内作出响应,从而提供出色的电流监测精度。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA226	数字电流监测	精度降低
INA300	2mm x 2mm QFN 封装	单一报警
INA301	迷你小外形尺寸封装 (MSOP)-8,采用模拟监视器的单路警报	单一报警
INA381	具有集成独立比较器的电流传感器,采用小型 2mm x 2mm 封装	单一报警

表 1:备选器件建议

SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”
SBOA163A	“高侧电机电流监控可提供过流保护”
SBOA167A	“集成电流感应信号路径”

表 2:相关的 TI 应用手册

用于提供过流保护的高侧电机电流监测

高精度大功率电机系统通常需要将转速、转矩和位置等详细反馈发送回到电机控制电路，从而高效精确地控制电机运行。

更简单的电机控制应用（例如固定运动任务）可能不需要相同水平的精确系统反馈，因为它们可能只需要知道系统是否在其路径中遇到意外物体或者电机绕组是否短路。添加简单的超出范围检测功能可以使指示超出范围事件的速度有所提升，因此实现动态控制和主动监测的更复杂的电机控制系统能够从中获益。

通过将电流检测放大器与直流电源串联，驱动电机驱动电路的高侧 - 如图 1 所示 - 可以轻松测量流入电机的总电流，

以检测超出范围的情况。要检测微小的泄漏，您还可以测量低侧返回电流。高侧和低侧电流电平之间的差异表明在电动机或电动机控制电路内存在泄漏路径。

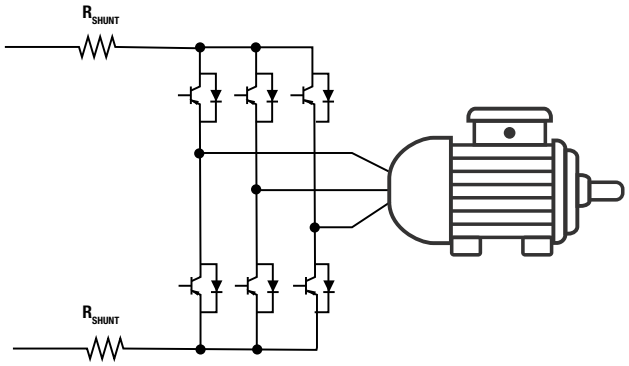


图 1：低侧和高侧电流检测

直流电压电平随电机额定电压而异，从而导致可适应相应电压电平的多种电流测量解决方案。对于低电压电机（约 5V），选择用于监测此电流的电路要简单得多，因为多种放大器类型（电流检测、运算、差分、仪表）可以执行电流测量功能并支持该共模输入电压范围。

对于电压较高的电机（如 24V 和 48V），可用的选项局限于专用电流检测放大器和差分放大器。随着电压要求不断提高，测量误差开始影响有效确定超出范围情况的能力。

一种用于说明放大器在高输入电压电平下运行时的有效性的规格是共模抑制 (CMR)。该规格直接说明了放大器输入电路对高输入电压干扰的抑制效果。在理想情况下，放大器可以完全抑制或消除两个输入引脚的共用电压并且仅对两者之间的差分电压进行测试它们。不过，随着共模电压的上升，放大器输入级中的漏电流将导致额外的输入失调电压。较大的输入范围级别将按比例产生较大的测量误差。

例如，CMR 规格为 80dB 的放大器（差分或电流监测）会在测量结果中根据输入电压电平引入较大的失调电压。CMR 规格 80dB 对应于针对施加到输入的每伏特电压在测量中产生额外的 100µV 失调电压。

许多器件具有规定的工作条件（例如，共模电压 [VCM] = 12V，电压源 (VS) = 5V），这建立了默认规格（具体而言，即 CMR 和电源抑制比 [PSRR]）的基线。例如，在 60V 共模电压下运行会导致 VCM 变化 48V (60V-12V)。在 80db CMR 下，除了器件数据表中指定的输入失调电压之外，48V 变化还会导致产生额外的 4.8mV 失调电压。

该额外产生的失调电压不会显著影响采用校准方案的应用。不过,对于系统校准无法解决该偏移漂移的应用,选择具有更佳 VCM 抑制的放大器至关重要。

INA240 是一款专用的电流检测放大器,其共模输入电压范围为 -4V 至 +80V,在该器件的整个输入和温度范围内的最坏 CMR 规格为 120dB。120dB 的 CMR 对应于共模电压每变化 1V 额外产生 1µV 的输入失调电压。温度对放大器抑制共模电压能力的影响在许多产品的数据表中都没有详细记录,因此除了室温规格之外,您还应对该影响进行评估。

INA240 在整个 -40°C 至 +125°C 的温度范围内可确保 120dB CMR 规格。INA240 在整个温度范围内的典型 CMR 性能为 135dB(每变化 1V 产生的失调电压小于 0.2µV),如图 2 所示。

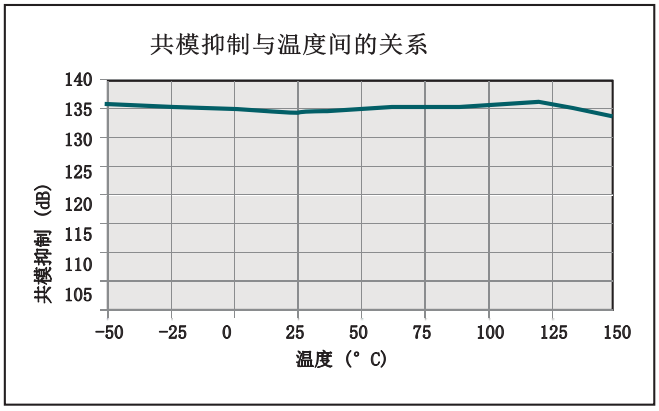


图 2:共模抑制与温度间的关系

系统控制器能够根据电流检测放大器的测量结果来评估系统的运行情况。将当前信息与预定义的运行阈值进行比较可以检测出

超出范围事件。高侧电流检测放大器后面的比较器可以轻松检测

并快速向系统发出警报,从而使系统能够采取纠正措施。

图 3 说明了用于在测量驱动电动机驱动电路的高电压轨上的电流时监测和检测超出范围偏移的信号链路径。与测量的输入电流成正比的输出信号会被导入 ADC,并且还被

发送到比较器以检测过电流事件。如果输入电流电平超出作为比较器基准电压的预定义阈值,则比较器警报将置位。

对过流检测电路的一项关键要求是能够检测出超出范围情况并快速作出响应。100kHz 的信号带宽和 2V/µs 的压摆率使 INA240 能够在几微秒的时间内精确测量和放大输入电流信号,并将输出发送到高速比较器,以根据短路情况

发出警报。该短暂的响应时间可确保系统中流过的意外过大电流不会损坏其他关键系统组件。

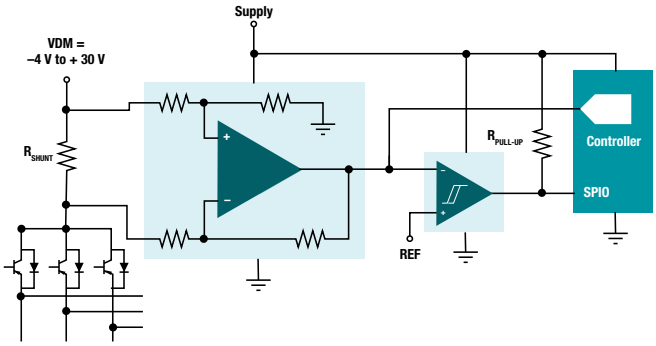


图 3: 高侧过流检测

备选器件建议

您可以将 LMP8640HV 用于测量高电压能力的应用，这些应用需要更高的信号带宽或更小的封装。

对于需要能够承受更高电压的应用，可选择 INA149，这是一款高性能差分放大器，能够连接高达 ±275V 的共模电压（电源电压为 ±15V），并保证 CMR 为 90dB（或输入每变化 1V，产生 31.6µV 的失调电压）。

INA301 是一款具有板载比较器的精密电流检测放大器，可检测高达 36V 的共模电压下的过流事件。

器件	经优化的参数	性能折衷
LMP8640HV	封装：小外形晶体管 (SOT) 23-6，信号带宽	精度
INA149	VCM 范围：±275V	CMR，增益
INA301	板载比较器：35µV 偏置电压	VCM：0V 至 36V

表 1：备选器件建议

SBOA160B	“具有增强型 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量”
SBOA161B	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”
SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”
SBOA165B	“高压电源轨的精密电流测量”

表 2：相关的 TI 应用手册

第 3 章：开关系统中的电流检测

具有增强型 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量

随着提升系统效率的需求不断增长，我们面临着改善电机工作效率和控制功能的直接压力。几乎所有类型的电机均面临着这种需求压力，包括白色家电、工业驱动器和汽车应用中使用的电机。

为了确保电机以其峰值效率运行，其反馈到控制算法中的运行特性至关重要。相电流是系统控制器使用的这些重要诊断反馈要素（用于实现最佳的电机性能）之一。由于测量信号具有连续性并与相电流直接相关，因此，测量电机电流的理想位置应直接与每个相位保持一致，如图 1 所示。测量其他位置（例如每个相位的低侧）的电流需要进行重组和处理，然后控制算法才可以使用有意义的数据。

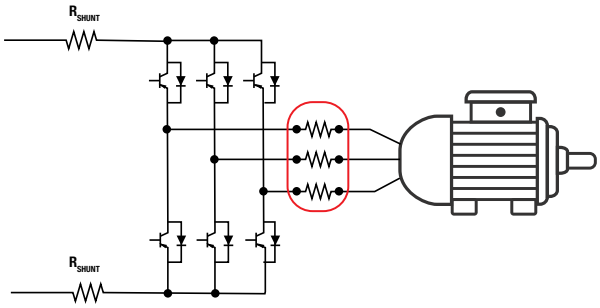


图 1：直列式电流检测

电机的驱动电路可生成脉宽调制 (PWM) 信号来控制电机的运行。这些调制信号使得位置与各电机相位一致的测量电路进行共模电压 (VCM) 转换，在转换过程中，电压将在极短时间内在不同高电压电平之间进行切换。完美的放大器能够完全抑制测量的 VCM 分量，仅放大与流经分流电阻器的电流相对应的差分电压。不幸的是，实际的放大器并不理想，会受到大 PWM 驱动输入电压阶跃的影响。由于实际的放大器无法进行无限的抑制共模，因此放大器输出端可能会出现与每个输入电压阶跃相对应的大幅度意外干扰，如图 2 所示。这些输出干扰（或故障）可能极大，输入转换后需要很长时间才能稳定，具体取决于放大器特性。

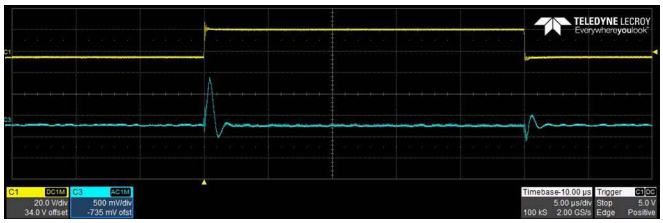


图 2：大输入 VCM 阶跃产生的典型输出干扰

此类测量的常用方法是选择带宽较高的电流检测放大器。为了保持在可听频率范围之上，典型的调制频率范围为 20kHz 至 30kHz。用于在这些 PWM 驱动应用中进行直列式电流测量的放大器选择以信号带宽在 200kHz 至 500kHz 范围内的放大器为目标。以往选择放大器时并不基于显著低于 PWM 信号带宽的实际信号带宽。选择更高的放大器带宽可以使输出干扰在输入电压转换后快速稳定下来。

INA240 是一款高共模双向电流检测放大器，专为这些类型的 PWM 驱动应用而设计。该器件通过使用集成式增强型 PWM 抑制电路来显著降低输出干扰并快速稳定，

从而解决在存在大共模电压阶跃时测量小差分电压的问题。标准电流检测放大器依靠高信号带宽使输出在阶跃后快速恢复，而 INA240 快速电流检测放大器具有内部 PWM 抑制电路，可以在改进输出响应的同时降低输出干扰。

图 3 说明了 INA240 输出响应在此内部增强型 PWM 抑制功能作用下的改进。

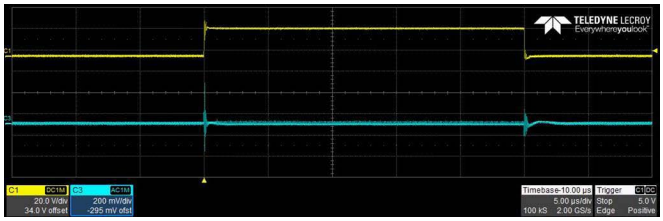


图 3：通过增强型 PWM 抑制减少输出干扰

对于许多三相应用，有少量与该直列式电流测量精度相关的要求。除了具有快速响应的输出以确保对补偿回路的充分控制之外，还需要具有有限的输出干扰，以防止出现错误的过流指示。对于电动助力转向 (EPS) 等其他系统，必须通过精密电流测量为转矩辅助系统提供所需的反馈控制。

EPS 系统的主要目标是通过在驾驶员施加于方向盘上的转矩上增加额外的转矩以帮助转向，同时在转向响应中提供与驾驶条件相对应的典型注意事项。在该严格控制的系统中，相间电流测量误差会变得非常明显。相位之间的任何未加考虑的变化都会直接导致驾驶员通过方向盘察觉到的扭矩波动增大。

减少测量误差，尤其是温度引发的误差对于保持精确反馈控制并提供无缝用户体验至关重要。

常用的系统级校准能够不断降低室温下对于放大器性能的依赖性，从而实现精确的测量。

然而，随着运行温度的不断变化，考虑参数漂移（如输入偏移电压和增益误差）更具挑战性。良好的温度补偿方案基于放大器在整个温度范围内的性能变化特征，并依赖于系统间对外部条件的一致且可重复的响应。对于降低对复杂补偿方法的需求而言，在将温度引起的偏移降至最低的情况下提高放大器保持稳定的能力是一种理想选择。

INA240 在室温下具有 25µV 的最大输入失调电压和 0.20% 的最大增益误差规格。对于要求温度稳定测量的应用，该器件的输入失调电压漂移为 250nV/°C，放大器增益漂移为 2.5ppm/°C。即使工作温度在系统的完整温度范围内发生变化，测量精度依然恒定不变。INA240 将测量温度稳定性、宽动态输入范围和增强型 PWM 输入抑制（这一点最重要）融合在一起，非常适合需要精确可靠的测量以实现精确控制性能的 PWM 驱动应用。

备选器件建议

INA282 能够非常精确地测量大共模电压，这些电压的变化速度不会像 PWM 驱动应用的典型变化速度那样快，因此您可以在高电压直流应用中使用它。

LMP8481 是一款双向电流检测放大器，适用于不要求放大器的输入电压范围中包含接地的高共模电压。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA282	共模输入范围: -14V 至 +80V;迷你小外形尺寸封装 (MSOP)-8	低带宽,非常适合直流应用
LMP8481	低功耗: 155µA;MSOP-8	共模输入范围: 4.5V 至 76 V;精度更低

表 1:备选器件建议

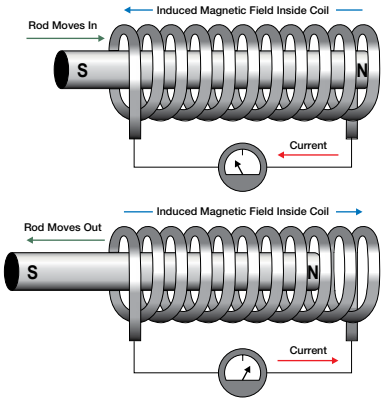
SBOA161B	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”
SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”
SBOA163A	“高侧电机电流监控可提供过流保护”
SBOA165B	“高压电源轨的精密电流测量”

表 2:相关的 TI 应用手册

具有 PWM 抑制功能的高侧驱动、高侧电磁阀监视器

电磁阀是一种机电设备,通过将线圈绕在可移动的铁质材料(称为电枢或栓塞)上制成。通过线圈的电流产生磁场,使电枢在固定范围内移动。图 1 是机电电磁阀的图示。

您通常会在简单的开/关应用(例如仅需要两种工作状态的继电器)中找到电磁阀,电磁阀也用于电流与电枢的位置成正比的线性操作。线性电磁阀用于需要精确调节压力、液体流动(如工业应用)或气流(如关键医疗应用)的设备。在汽车应用中,线性电磁阀用于燃油喷



射器、变速器、液压悬架甚至触觉效果

图 1:机电电磁阀结构

存在多种用于连接和驱动电磁阀的配置。一种常见的方法是使用高侧驱动器配置,其中电流检测放大器连接在高侧开关和电磁阀之间,如图 2 所示。这种配置的一个好处是当高侧开关

关闭时,电磁阀与电池电压隔离。避免电磁阀与电池电压持续相连可减缓电磁阀老化并防止其过早出现故障。

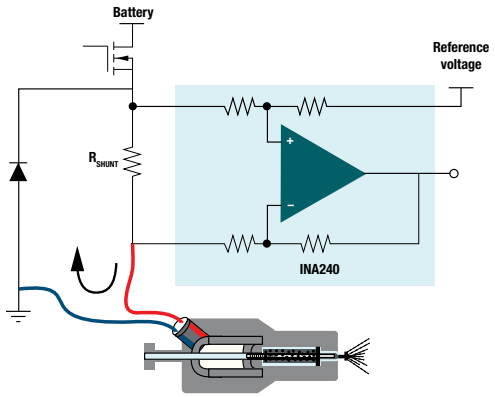


图 2:采用高侧电流检测放大器的高侧驱动

图 2 中所示的电流检测放大器必须能够抑制高共模 dv/dt 信号,并支持降至接地以下的共模电压。当高侧开关接通时,电磁阀由从电池流出的电流供电。高侧开关的占空比决定

流经电磁阀的电流,该电流又相应地

控制柱塞的行程。当高侧开关断开后，电流流经反激式二极管，强制共模电压将一个二极管的电压降至接地电压以下。

电磁阀和阀具有很高的电感。电磁阀的有效阻抗可简化为电阻和电感。线圈使用铜（4,000ppm/°C）制造，有效电阻随电磁阀的类型而异，范围为 1Ω（用于触觉应用）至 10Ω（用于线性或位置阀系统）。所有电磁阀的电感均介于 1mH 和 10mH 之间。

图 3 显示了 25°C 和 125°C 时开环模式下电磁阀驱动器的电流曲线。在 100°C 的环境温度升高幅度下（无铜

电阻补偿），柱塞行程精度约为 40%。电磁阀电流直接控制栓塞的行程。如果环境温度发生变化，则栓塞的行程随之改变，这将影响压力、液体或空气调节等输出控制。

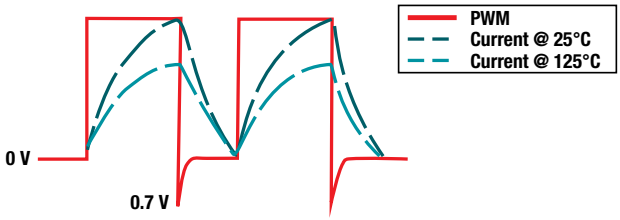


图 3：整个温度范围内的电磁阀电流曲线

通过测量电磁阀和阀应用中的电流，可以检测电磁阀工作特性的变化。通过电流测量，可以利用老化的电磁阀的磁场减小

在有故障的组件失灵之前识别这些组件。在开环电磁阀控制系统中，有效阻抗的变化会在铜绕组温度上升 100°C 时发生 40% 的漂移。电流

控制反馈环路中使用的电流测量

可以将电磁阀在整个温度范围内的阻抗变化从 40% 降低至 0.2%（使用 INA240 电流检测放大器）。

INA240 是一款高侧双向电流检测放大器，可支持 -4V 至 +80V 的大共模电压。INA240 采用可抑制 dv/dt 信号的电路，专为在脉宽调制 (PWM) 应用中工作而设计。它可以缩短消隐时间，从而能够以较低的占空比实现精确的 PWM 电流测量。

该器件的低失调电压、漂移、增益和 400kHz 的高带宽可实现精确的直列式电流测量。需要精确控制液体、空气和压力的阀应用将受益于电流测量期间的精度和温度稳定性。

备选器件建议

如果您需要较低的负共模电压，请考虑 INA193。该器件 -16V 的输入范围能够在电磁阀跳变电压较高时提供充足的裕量。不过，INA193 存在一个折衷，即 PWM 干扰抑制及其针对高 dv/dt 信号可实现快速稳定的响应。

对于需要更高信号带宽和低输入失调电压漂移的应用，LMP8640HV 是另一款能够满足高侧驱动配置要求的电流检测放大器。

LMP8278Q-Q1 符合汽车电子委员会 (AEC)-Q100 标准，可在 -40°C 至 +125°C 的环境温度范围内保证器件规格。在采用范围

为 -2V 至 +40V 的共模电压时，您可以在需要精确控制底盘中的电磁阀的动力系统应用中

使用 LMP8278。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA193	共模电压范围: -16 V 至 +60 V	Bandwidth, accuracy
LMP8640HV	带宽:950kHz	压摆率,更长的阶跃响应稳定时间
LMP8278Q-Q1	共模电压范围: -2V 至 +40V,共模抑制比	转换率

表 1:备选器件建议

SBOA160B	“具有增强型 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量”
SBOA161B	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”
SBOA163A	“高侧电机电流监控可提供过流保护”
SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”

表 2:相关的 TI 应用手册

开关电源中的电流模式控制

大多数开关电源采用闭环反馈电路,以便在各种瞬态和负载条件下提供稳定的电源。反馈方法选项分为两大类:电压模式控制 (VMC) 和电流模式控制 (CMC)。这两种方法各有优点和缺点,我们可以根据它们的优缺点来确定适合终端设备应用的选择。

控制方法

VMC 将经调节的输出电压值用作反馈信号。该方法为控制路径提供了简单直接的反馈架构,但确实存在一些缺点。最大的缺点是输出电压

调节需要首先检测到输出电压的变化并通过整个反馈信号和滤波器进行传播,然后才能对输出进行相应的补偿。

对于需要高水平调节的系统而言,这可能会产生慢得无法接受的响应。全新

反馈补偿需要较高级别的分析,以解决输出低通滤波器导致的两个极点。此外,还必须

对反馈组件值进行调节,因为不同的输入电压会影响总体环路增益。

CMC 通过将电感器电流波形用于控制来解决 VMC 的不足。该信号作为第二个快速响应控制环路包含在输出电压反馈环路中。额外增加的反馈环路很有可能会增加电路/反馈的复杂性,因此,作为设计要求的一部分,您需要评估其优点。

通过将电感器电流用作反馈控制的一部分:

- 与仅将输出电压用于反馈控制相比,附加的电流反馈环路响应更快。此外,利用电感器电流信息,您可以将电路设计为提供逐脉冲限流功能,以允许针对限流需求进行快速检测和控制。
- 电源看起来类似于电压控制型电流源。这允许进行模块化电源设计,以支持在并行配置中的多个电源之间进行负载共享。
- 可以将控制环路中的电感器影响降至最低,因为电流反馈环路能够有效地降低对单极补偿的要求。

尽管 CMC 可解决 VMC 的某些缺点,但它也会带来可能影响电路性能的挑战。增加电流反馈环路会增加

控制/反馈电路和电路分析的复杂性。选择 CMC 时，您需要考虑的其他因素包括整个占空比范围内的稳定性和对噪声信号的敏感性。CMC 可以分为多种不同类型的控制方案：峰值、谷值、仿真、迟滞和平均 CMC。让我们来讨论电路设计中两种最常用的方法：峰值和平均 CMC。

峰值 CMC

峰值 CMC 直接将电流波形用作脉宽调制 (PWM) 生成比较器中的

斜坡波形，而不是像 VMC 那样使用外部生成的锯齿或三角信号。电感器电流或高侧晶体管电流波形的上升斜坡部分可在现有电压控制环路之外提供快速响应控制环路。如图 1 所示，将电流信号与电压误差放大器的输出进行比较可以为电源生成 PWM 控制信号。

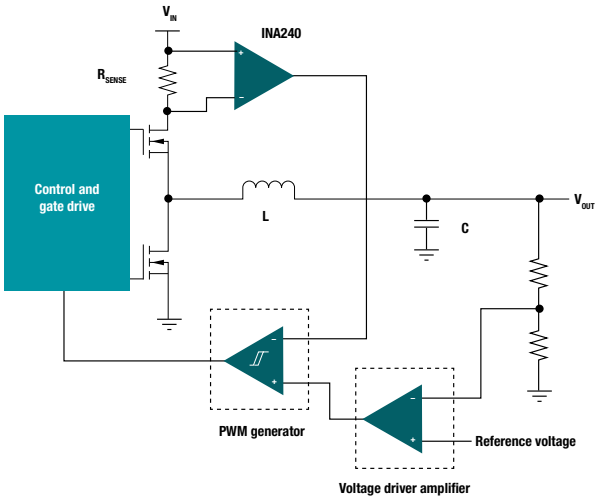


图 1：峰值 CMC 电路的方框图

开关电源可在输入和输出电源轨之间提供高级别的效率。为了保持高转换器效率，用于测量电感器电流的检测电阻器应尽可能小，以降低测量导致的功率损耗。该小值电阻器可导致小振幅反馈信号。

由于电感器电流波形直接

用作比较器输入信号，因此峰值 CMC 容易受噪声和电压瞬态的影响，这是众所周知的。在使用

INA240 等具有高共模抑制比 (CMRR) 的电流检测放大器可抑制与 PWM 信号和系统相关联的瞬态。凭借 INA240 的增益灵活性，可以对电感器电流波形进行放大，以便为比较提供更大的信号，而无需额外的增益或牺牲性能。此外，低偏移和低增益误差可减少设计变化和温度变化。

为了使用峰值 CMC，电感器电流需要高共模电压测量。全新

共模范围允许宽电源输入和输出电压范围。峰值 PCMC 通常会添加斜坡补偿以解决占空比大于 50% 时的稳定性问题。系统会首先为电感器电流添加斜坡补偿，然后才能将其用作比较器输入信号。

平均 CMC

平均 CMC 会首先使用电感器电流波形和附加的增益和集成级，然后再将信号与外部提供的斜坡波形进行比较（与 VMC 类似）。这可以提高防噪性能并且无需斜坡补偿。图 2 显示了降压转换器的平均 CMC 运行方框图。

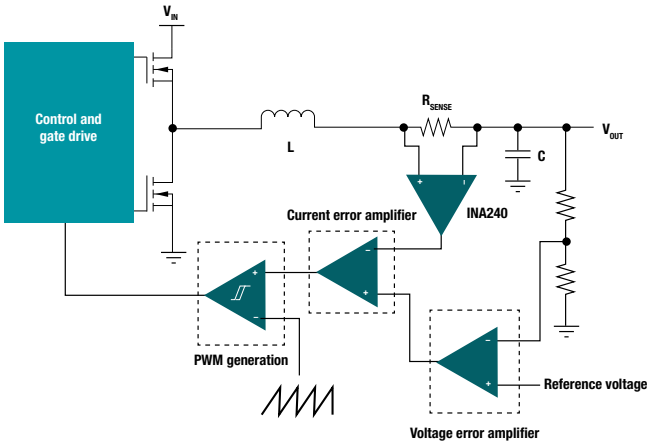


图 2：平均 CMC 电路的方框图

使用平均 CMC 可以通过 INA240 的高 CMRR 将峰值 CMC

的噪声敏感性提高到可接受的性能水平，从而有助于进一步降低瞬态。需要利用 INA240 的高共模范围来进行电感器电流测量，并允许在宽输出电压范围中使用电流放大器。INA240 的高精度和低漂移规格可在不同的温度和组件上提供一致的测量。

INA240 为测量精度提供必要的性能和功能，以保持良好的信号完整性控制。INA240 在室温下

具有 25μV 的最大输入失调电压和 0.20% 的最大增益误差规格。温度稳定性对维持系统性能而言非常重要，INA240 可提供 250nV/°C 的输入失调电压漂移和 2.5ppm/°C 的放大器增益漂移。INA240 具有增强型 PWM 抑制功能，以提高大共模瞬态和宽共模输入范围条件下的性能，从而适应最大的电源输出电压变化。

备选器件建议

INA282 允许针对高共模电压进行电流测量，这使其成为不具有 PWM 信号的高电压直流应用的理想之选。

LMP8481 是一款双向电流检测放大器，适用于不要求放大器的输入电压范围包括接地的高共模

电压应用。

开关电源电流测量

有多种不同的可以满足系统电源要求的开关电源拓扑。直流/直流开关转换器可以将较高电压

直流轨降低为较低电压直流轨。这些转换器架构包括降压、升压、降压/升压和

反激式拓扑。直流/交流开关转换器可以将直流输入电压转换为交流输出电压。

顾名思义，开关转换器采用

各种开关、晶体管/场效应管 (FET) 和/或二极管，以

高系统效率水平将输入电压转换为所需的输出

电平。在尝试精确测量电流波形时，这些转换器的开关性质带来了挑战。在选择电流检测放大器时，需要考虑电压节点要求、系统控制要求和测量漂移等因素。

电压节点要求

电路架构中的每个节点具有不同的共模电压和行为。在其中的每个位置测量电流时，需要在测量电路中考虑的特性各不相同。

图 1 说明了降压

降压转换器.该电路显示了一个包含半 H 桥输出级以及由电感器和电容器构成的低通滤波器的基本电路。未显示控制电路、输出级驱动器和负载。

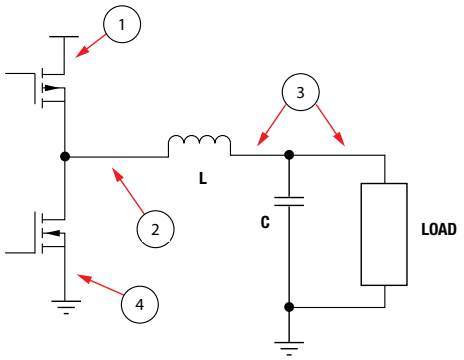


图 1：直流/直流开关电源 - 降压架构

节点 1 的电压取决于转换器的输入电源。这是转换器将“降压”到较低输出电压的高电压。在该节点上进行的电流测量将测量流经半 H 桥的高侧器件的电流，主要用于使用比较器进行过流/短路检测。在该节点上进行任何测量时，需要具有高共模电路且该电路的性能要能满足测量小差分电压的要求。

节点 2 是半 H 桥的中点，它显示了开关电源所基于的脉宽调制 (PWM) 信号。在该位置进行的电流测量可以提供电感器电流，以用于系统控制和过流/短路检测。会对以 PWM 比率在高电压和接地（或负电源）之间进行的转换求平均值，以生成正确的输出电压。

节点 2 的电压将具有急剧的共模转换，因此在此处进行的测量需要能够在幅度上处理转换电压，并且能够抑制输出波形中的瞬态。节点 3 的电压是转换器输出电压，在示波器上观察时，它是具有小电压纹波的直流电压电平。在该位置进行的测量将具有与节点 1 类似的要求，可提供电感器电流以用于系统控制和过流/短路检测。

虽然节点 3 的电压低于节点 1 的电压，但所需的输出电压电平可能仍需要测量电路来处理高共模电压。节点 4 的电压依赖于电路的接地端。该节点将看到较低的、接近于接地的共模电平，因此，与前面提到的位置相比，在该位置进行的测量具有一系列更低的要求。其他直流/直流开关架构具有与上述节点类似的行为，不过它们可能处于转换器电路中的不同位置。

测量漂移要求

开关电源是用于实现电压电平转换的高效电路，但转换中仍存在功率损耗。这些功率损耗是表现为发热的系统效率损失。根据转换器的功率级别，这可能会成为相当大的热源。INA240 具有低热漂移规格，这意味着电流测量不会由于发热而显著变化。为了进一步降低发热，INA240 提供了不同的增益版本，从而减小电流检测电阻器的值。

传统放大器的性能可能会随着放大器增益的增大而显著下降。通过之下，INA240 的所有增益版本均具有出色的电气规格，可以在不同的增益型号上实现高性能水平。

表 1 比较了不同增益之间的功率耗散。

参数	增益		
	20 V/V	100 V/V	200 V/V
输入电压 (mV)	150	30	15
RSENSE (mΩ)	15	3	1.5
耗散的功率 (W)	1.5	0.30	0.15

表 1：功率耗散摘要（满量程输出电压 = 3V，电流测量 = 10A）

系统控制和监测要求

大多数开关电源采用闭环反馈系统来提供稳定、经过良好调节的电源。为了提供优化的反馈控制，需要进行精密测量。放大器规格（如偏移和增益误差等）可以显著影响

控制系统的调节功能。根据系统要求和预期的电路复杂性，可以使用不同的反馈方法。

此外，系统电源监控是一项不断增长的需求，因为设计会优化并报告终端设备不同工作模式期间的功耗。

电压模式反馈将调节版本的输出电压与基准电压进行比较，以获取误差电压。该反馈方法相对简单，但提供的反馈较慢，因为

系统必须允许输出电压变化才能进行调节。针对电压模式反馈的电流测量通常监测负载电流，

并且确定是否存在任何短路。电压模式反馈转换器的最重要的电流放大器标准是转换器的共模输出电压。这些转换器上的输出电压范围广泛，涵盖用于微处理器和低电压数字电路的低电压（1.8V 至 5V）到用于 48V 或更高电压系统的高电压。经过滤波器之后的输出波形可能仍包含可能会干扰测量或导致测量出现误差的噪声/瞬态。

电流模式反馈向使用系统电流的控制系统添加了反馈环路。通常使用的电流是转换器中的电感器电流（请参阅图 2）。这可以提供与电压反馈环路并行运行且快得多的内部环路。一般而言，电流模式反馈的一个缺点是容易受信号上噪声/瞬态的影响。

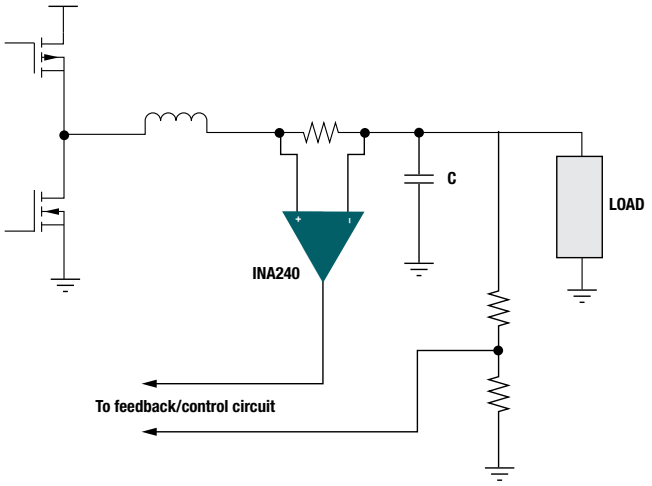


图 2: 用于电源控制反馈的电流检测

电流模式反馈通常分为峰值电流模式控制和平均电流模式控制。峰值电流模式控制直接使用电感器

电流，因此信号上的任何噪声或瞬态都会在反馈环路中产生干扰。INA240 具有高共模抑制比 (CMRR)，这有助于减弱输入信号导致的任何潜在干扰或噪声。

备选器件建议

对于所需的性能水平低于 INA240 的应用，请使用 INA193 系列。

LMP8481 是一款双向电流检测放大器，适用于不要求放大器的输入电压范围中包含接地的高共模电压。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA193	宽共模输入范围，小型封装	无增强型 PWM 抑制功能，共模输入范围更低，增益选项更低
LMP8481	宽共模输入范围，低功耗	无增强型 PWM 抑制功能，增益选项更低，共模范围不包含接地

表 1：备选器件建议

SBOA160B	“具有增强型 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量”
SBOA161B	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”
SBOA169A	“高精度低侧电流测量”
SBOA170B	“集成电流感测电阻”

表 2：相关的 TI 应用手册

使用高速放大器监测低侧分流电流，以增加测量带宽

通过低侧分流电阻器准确快速地检测负载电流的需求是过流保护、更快的反馈控制环路、精确的电池和电源监测所需的一项关键应用。通常使用低侧电流检测来测量负载电流，此时测量

在负载和地之间放置的检测电阻器上的电压。以分立方式实现低侧电流监测的一种常见方法是在差分配置中使用电流检测放大器，如图 1 所示

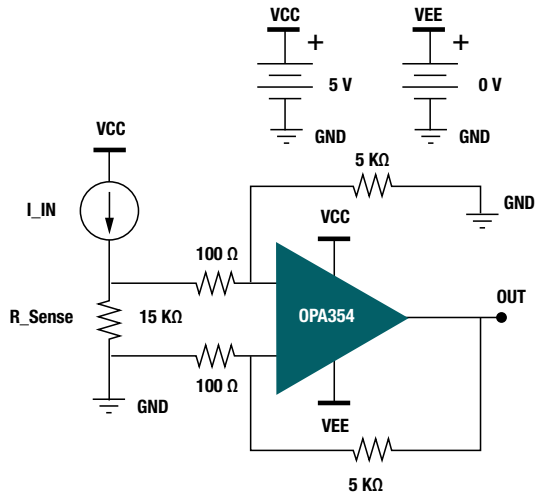


图 1：采用 OPA354 的低侧电流检测测试电路

传统上，低侧电流测量应用使用专用电流检测放大器、精密放大器或通用放大器（连接到外部检测电阻器）。不过，在需要检测小型高速瞬态脉冲的应用中，这些器件往往缺乏在单个增益级中准确复制脉冲所需的足够带宽。

一种可能的解决方案是使用多个具有较低带宽器件的增益级，从而增加组件的数量并且可能增大检测电阻以便使用较小的增益。使用大型检测电阻器会向信号中引入噪声，增加功率耗散并导致接地干扰。

相反，另一种解决方案是使用单个

高速放大器。通过使用高速放大器，您可以获得更高的增益带宽，从而可以使用单个具有小型检测电阻器的高增益级。

对于电流检测应用，您需要选择具有低偏移和噪声的放大器，以免降低低电压测量的精度。

考虑广泛使用的运算放大器，例如 OPA365。该器件的最大输入失调电压为 200μV，输入电压噪声在 100kHz 时为 4.5nV/√Hz。OPA365 等放大器

可以在单个高增益级中实现

该电路，节省布板空间，保持较低的检测电阻器值，并通过单个器件驱动模数转换器 (ADC)。选择正确的放大器可简化可能导致系统损坏或降低电机和伺服效率的高电流尖峰检测，同时最大限度地提高系统效率。与传统方法相比，使用高速放大器解决方案有多项优势。例如，在电源监控等应用中，脉冲持续时间可能低至 1μs。如果不能检测到这些瞬态，短暂的脉冲可能会被忽视，从而导致干扰或系统的其余部分受到潜在损坏。

图 2 显示，对于增益为 50 的 1μs 短暂脉冲输入，OPA354 能够达到 3V 的输出并且能够以比 400kHz 仪表放大器或 20MHz 带宽运算放大器高得多的相似度复制原始输入信号。通过查看图 3 可知，以增益 50 引入 100nA 的输入脉冲，OPA354 的输出响应具有比 INA 和低带宽器件的输出响应高得多的相似度。

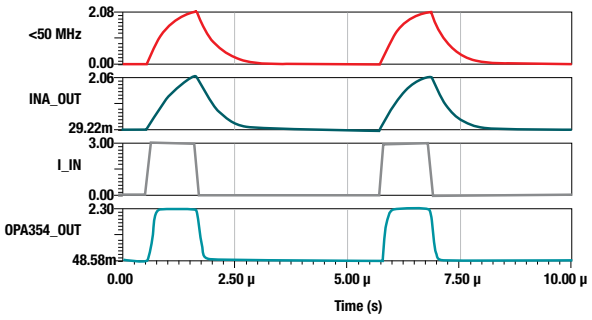


图 2：增益为 50 时 400kHz 仪表放大器与 20MHz 带宽放大器对 15mΩ 3A 1μs 输入的响应 请查看表 1。

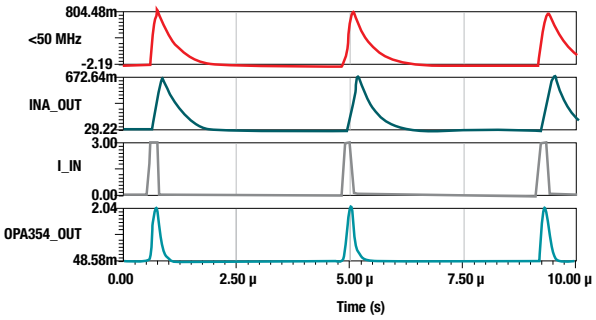


图 3：增益为 50 时 400kHz 仪表放大器与 20MHz 带宽放大器的 15mΩ 100nA 脉冲输入

在另一个示例中，您可以采用一个三相逆变器检测电阻器来检测较大的负相电压。这些脉宽调制 (PWM) 占空比往往非常小：大约为 2μs。电流检测放大器必须能够在此时间范围内稳定至 <1%，并且在许多情况下将驱动 ADC 以实现最高的系统性能。在三相逆变器等应用中，您需要在最大的输出相对时间变化率下保持低失真。一般而言，高速放大器可提供高于 25V/μs 的压摆率和小于 0.5μs 的快速建立时间，因此，当输入阶跃变化导致很高的输出电压变化率（表现为短电流脉冲的形式）时，这些放大器是理想之选。鉴于高压摆率、更大的带宽和快速稳定，高速放大器有助于将检测时间缩短至几微秒。通过将高速放大器用于电机控制应用，您可以进行快速精确的电流测量，以实现最佳的动态电机控制、最小的扭矩波动和最小的可听噪声。

传统上，当使用运算放大器测量来自分流电阻器的小差分电压信号时，您需要确保运算放大器具有足够的带宽，以便进行精确的测量，而不会给信号带来误差，从而实现最高的罪魁祸首之一。测量短暂的脉冲可能是一项挑战，但通过使用高速放大器，您可以获得高压摆率和足够的带宽来跟踪输入信号。

备选器件建议

对于需要具有与 OPA365 相似性能但具有更高带宽和压摆率的应用，OPA836 系列可提供 560V/μs 的压摆率以及 120MHz 的增益带宽积。

对于需要 OPA365 性能但电源范围更高的应用，LMH661x 系列可提供最高 12.8V 的电源。有关更多备选器件，

器件	经优化的参数	性能折衷
OPA836	带宽更高,功耗更低	-V 电压轨输入,输出电流稍小一些
OPA354	带宽更高,压摆率更高,输出电流更高	偏移和功耗稍高一些
LMH6618	电源最大值更高,带宽更高,Iq 更低	噪声稍高一些,输出电流更小
LMH6611	电源最大值更高,带宽更高,压摆率更高	-V 电压轨输入,功耗稍高一些

表 1:备选器件建议

TIDA-00778	“具有增强型 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量”
TIDA-01418	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”

表 2:备选技术配套资料

第 4 章:集成电流检测信号链

集成电流检测信号路径

在电子系统中,电流测量可提供反馈,以验证操作是否处于可接受的范围内并检测任何潜在的故障情况。

分析系统的电流电平可以诊断意外的运行模式,从而实现可以提高可靠性或保护系统组件免受损坏的调整。

电流是一种难以直接测量的信号。

不过,可以采用多种测量方法来测量电流的效应。流经导线的电流会产生磁场,可以通过磁传感器(例如霍尔效应传感器和磁通门传感器)检测到

例如).当电流通过时,还可以通过测量电阻器上产生的电压来测量电流。这种类型的电阻器称为电流检测电阻器或分流电阻器。

对于低于 100V 的电压轨上最高 100A 的电流,通常首选分流电阻器进行测量。与磁解决方案相比,分流电阻器测量方法物理尺寸更小、精度更高并且具有温度稳定性。

要评估和分析系统的电流信息,必须将测量结果数字化并将其发送到系统控制器。用于测量并转换在分流电阻上产生的信号的方法有多种。最常见的方法是采用模拟前端将电流检

测电阻器的差分信号转换为单端信号。然后将该单端信号连接到一个模数转换器 (ADC),该 ADC 连接到一个微控制器。图 1 说明了一个电流检测信号链。

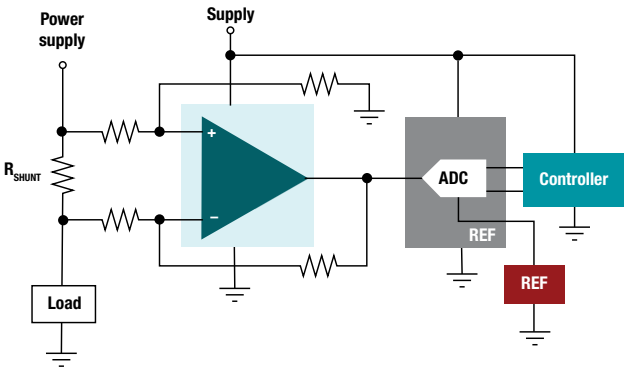


图 1:电流检测信号路径

要优化电流检测信号链,必须针对 ADC 的电流范围和满量程输入范围选择适当的分流电阻器值和放大器增益。选择分流电阻器时,需要基于测量精度与分流电阻器功率耗散之间的折衷进行考虑。电阻器值越大,电流流过时产生的差分电压就越大。由于放大器偏移电压固定不变,因此测量误差会比较小。然而,分流电阻上的信号越大,其功耗 (P = I2R) 就越大。分流电阻器越小,分流电阻器上产生的压降就越小,从而降低功率耗散要求,但由于放大器的固定偏移误差在信号中所占的百分比变大,因此也会增大测量误差。

通过选择支持所需放大器增益的相应器件,可确保放大器的输出信号在满量程输入电流电平下不会超过 ADC 的满量程输入范围。

INA210 是一款专用电流检测放大器,其中集成了外部增益设置电阻器,如图 2 所示。与典型的外部增益设置电阻器相比,将这些增益电阻器内置到器件中可以提高匹配度和温度漂移稳定性。器件采用节省空间的无引线四方扁平 (Q FN) 封装,可显著降低运算放大器和外部增益电阻器的布板空间的要求。电流检测放大器

通常具有多种固定增益水平,因此可根据输入电流和 ADC 满量程输入范围更好地优化与分流电阻器值的配对。

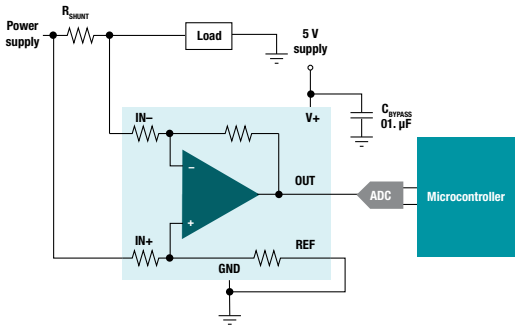


图 2: INA210 电流监测放大器

图 1 显示了运算放大器测量分流电阻器上产生的差分电压并将放大的信号发送到单端 ADC 的情形。全差分输入 ADC 可以直接监测分流电阻两端的差分电压。使用典型 ADC 的一个缺点是会减小输入范围。分流电阻器上产生的信号会很小,从而降低了该组件的功率耗散要求。较低的 ADC 分辨率也会影响小信号的测量精度。

ADC 基准是该信号路径中您必须评估的另一个误差源。典型 ADC 的输入范围基于转换器的基准电压。实际基准电压范围因器件而异,但通常处于 2V 至 5V 范围内。

最低有效位 (LSB) 基于转换器的满量程范围和分辨率。例如,满量程输入范围为 2.5V 的 16 位转换器具有 约 38µV 的 LSB。

The INA226 是一款专为双向电流检测放大器设计的专用 ADC。与典型 ADC 不同,这款 16 位转换器具有 ±80mV 的满量程输入范围,无需放大输入信号以最大限度地扩大 ADC 的满量程输入范围。INA226 能够根据器件的最大输入失调电压 (10µV) 和 LSB 大小 (2.5µV) 来精确测量小分流电压。INA226 的分辨率是具有 2.5V 满量程输入范围的等效标准 16 位 ADC 的 15 倍。INA226 可以直接监测电流检测电阻器上的压降,如图 3 所示。

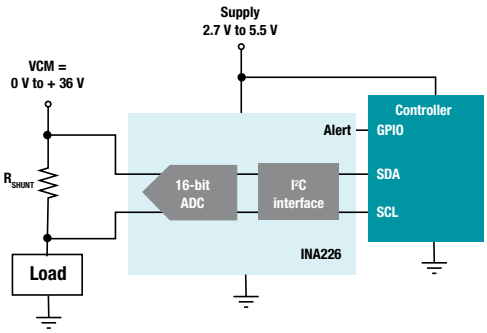


图 3:数字电流/功率监测

除了能够直接测量电流流过时分流电阻器上产生的电压,INA226 还可以测量共模电压。INA226 具有一个输入多路复用器,使 ADC 输入电路能够在差分分流电压测量和单端总线电压测量之间进行切换。

您可以将系统中存在的电流检测电阻器值编程到 INA226 的配置寄存器中。根据该电流检测电阻器值和测量的分流电压,片上计算

将分流电压重新转换成电流,并且可以直接读出系统的相应功率水平。在片上执行这些计算可减少转换该信息通常需要的处理器资源。

备选器件建议

对于具有更高性能要求的应用,INA190 可提供更小的输入失调电压以及更佳的漂移和增益误差性能。

对于性能要求较低的应用,INA199 仍然具有专用电流检测放大器的优势。

对于实现过流检测的应用,INA301 采用了集成比较器,可实现用时短至 1µs 的片上过流检测。

对于性能要求较低的应用,INA219 使您能够利用专用的电流检测 ADC。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA190	更精确	输入失调电压和增益误差更低
INA199	成本更低	输入失调电压和增益误差更高
INA301	信号带宽,板载比较器	封装更大:迷你小外形尺寸封装 (MSOP) -8
INA219	更小封装数字监测,成本更低	输入失调电压和增益误差更高

表 1:备选器件建议

SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”
SBOA165B	“高压电源轨上的精密电流测量”
SBOA160B	“具有增强型 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量”
SBOA161B	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”

表 2:相关的 TI 应用手册

集成电流检测电阻器

电流是评估和诊断电子系统运行效能最为常用的信号之一。由于直接测量该信号非常具有挑战性,因此转而使用各类传感器来测量由于电流流经整个系统而产生的相应效应。

电阻是检测系统中流经的电流最为常用的感测元件。将电阻器(称为分流器)与电流路径串联之后,当电流流经该电阻器时,会在该电阻器上产生差分电压。

用于监测电流信号的一种常见信号链配置包括模拟前端 (AFE)、

模数转换器 (ADC) 和系统控制器,如图 1 所示。AFE (例如运算放大器或专用电流检测放大器)将分流电阻器上产生的小差分电压转换为较大的输出电压,由 ADC 将该输出电压数字化,然后将相关信息发送至控制器。系统控制器使用该电流信息来优化系统的运行性能,或在发生超出范围的情况时通过减少功能来避免发生有害工况。

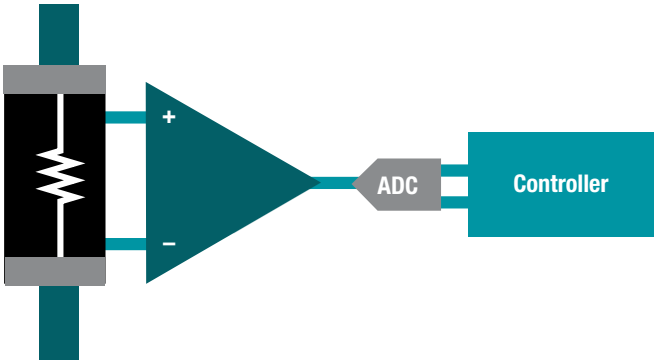


图 1:电流检测信号链

适当的电阻值选择对于优化信号链路径至关重要。电阻值以及分流电阻两端对应产生的电压会导致系统发生功率损耗。为限制功率损耗,最好将分流电阻降至最低。电阻器

值与产生的信号成正比,并发送到电流检测放大器。放大器具有与其关联的固定固有误差(例如输入失调电压),可影响测量精度。这些内部误差对于总体测量精度的影响随着输入信号的增大而降低。当输入信号下降时,相应的测量误差随之增大。信号电平和可接受的测量精度之间的这种关系通常为电流检测电阻器选择提供较低的限制。全新

根据应用针对该组件的可接受功率损耗来限制电流检测电阻器的上限值。

使用电阻器进行电流测量的一个好处是可以使用精确的元件，

从而提供高精度且温度稳定的测量。精密电流检测放大器的测量功能针对连接极小信号进行了优化，以满足使用低值电阻器和低功率损耗要求。

当电阻器的欧姆值降低至 10 毫欧

以下时，电阻器会有两种趋势。

这部分电阻器的一种趋势是封装

可用性和电阻器值都会降低。

另一种趋势是使用精密低温度系数组件的成本增加。如果使用温度系数较低的低欧姆值电流检测电阻器，同时兼顾精度容差水平（约 0.1%），那么解决方案的成本在未计入精密放大器相关成本的情况下便高达数美元。INA250（如图 2 中所示）或 INA253 等组件有助于减少为需要精确且温度稳定测量的应用选择这些精度更高、成本更高的电阻器所面临的挑战。该器件将精密、零漂移电压输出电流检测放大器与 2mΩ 集成电流检测电阻器相结合，可以在该器件 -40°C 至 +125°C 的完整工作温度范围内实现 0.1% 的最大容差和 15ppm /°C 的温度漂移。该器件可以承受高达 15A 的流经板载电阻器的连续电流。

除了该器件内部的集成精密电阻器之外，INA250 和 INA253 还解决了实现电流检测解决方案过程中最为常见的问题之一。低欧姆值分流电阻器可降低电流检测功率耗散。适应这种低电阻值所面临的一项挑战是

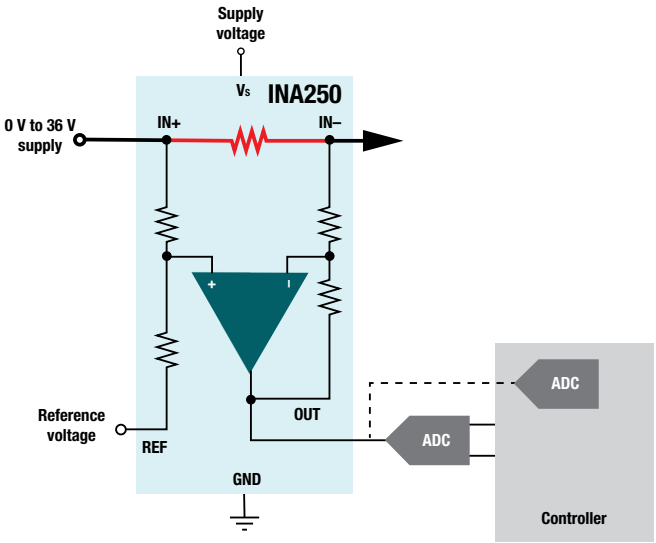


图 2：集成电流检测电阻器

寄生电阻对印刷电路板 (PCB) 的潜在影响。在电流流经电阻产生分压电压的同时，与分流电阻串联的寄生电阻会引发附加测量误差。糟糕的布局技术是这些测量误差的最常见来源。

需要使用开尔文连接（也称四端子连接或强制检测）来确保最大限度地降低额外产生的电阻，进而改变在放大器的输入引脚之间产生的差分电压。可以采用 PCB 布局技术来降低寄生电阻影响；不过，如果采用 INA250 或 INA253，就无需为此担忧。

如前所述，典型的电流检测信号链路径包括电流检测电阻器、模拟前端、ADC 和系统控制器。INA250 将分流电阻器和电流检测放大器组合

时域。INA260 将电流检测电阻器、测量前端和 ADC 组合到一个器件中。

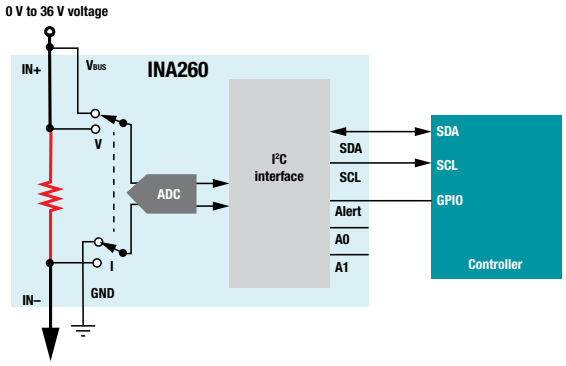


图 3:集成信号路径

将精密低漂移电流检测与这些精密电流检测器件配对使用,可实现采用分立式放大器和电阻器组合难以实现的测量解决方案。少数电流检测电阻器目录产品能够实现精密且温度稳定的测量,但以与薄型小外形尺寸封装 (TSSOP)-16 集成解决方案相当的解决方案尺寸实现该精度水平是不可能的。

图 3 显示 INA260 采用相同的精密集成检测电阻器,搭配使用针对电流检测应用进行了优化的 16 位精密 ADC。这种组合可实现

优于 INA250 的测量性能,在整个温度范围内的最大测量增益误差为 0.5%,最大输入失调电流为 5mA。

备选器件建议

对于电流要求比集成解决方案支持的电流更低且性能更低的应用,请使用 INA210 独立电流检测放大器。

对于需要独立数字电源监控器的应用,请使用 INA226。

对于实现过流检测的应用,INA301 采用了集成比较器,可实现时间短至 1µs 的片上过流检测。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA210	35µV 输入失调电压,封装:小外形无引线四方扁平 (QFN)-10	无板载电流检测电阻器
INA226	10µV 输入失调电压,封装:迷你小外形尺寸封装 (MSOP)-10	无板载电流检测电阻器
INA301	信号带宽,板载比较器	无板载电流检测电阻器

表 1:备选器件建议

SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”
SBOA165B	“高压电源轨上的精密电流测量”
SBOA167A	“集成电流感应信号路径”
SBOA169A	“高精度低侧电流测量”

表 2:相关的 TI 应用手册

集成式电流检测模数转换器

在不同的系统中，用来测量电流的信号链路径通常都是一致的。无论是在计算机、汽车还是电机中测量电流，几乎所有设备都具有相同的功能块。

连接光、温度（或本例中的电流）等现实世界元素需要使用传感器，以便将信号转换为更易于测量的比例值（电压或电流）。

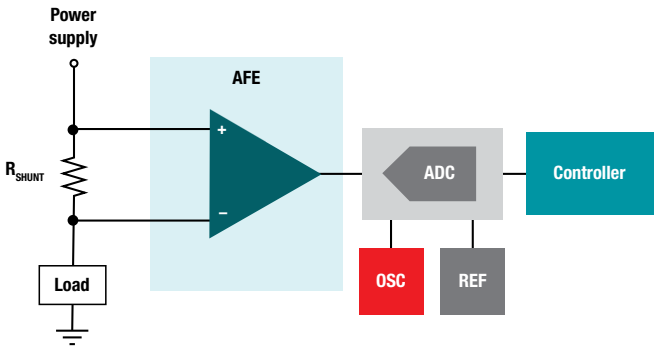
多种传感器都使用磁场感应来检测电流效应。这些传感器对于检测很大的电流或在需要进行隔离式测量时非常有效。

测量电流时最常用的传感器是电流检测或分流电阻器。将该组件与被测量的电流串联放置后，会在电流通过电阻器时产生成比例的差分电压。

信号路径中其余块的选择基于系统将如何使用该测量电流信息。对于大多数应用而言，有多个块是相同的，如图 1 所示。这些块包括用于放大传感器小信号的模拟前端 (AFE)、用于数字化处理传感器放大信号的模数转换器 (ADC)

以及用于分析传感器信息的处理器，以便系统可以相应地响应测量的电流水平。

图 1：电流检测信号链



对 AFE 的一项要求是允许直接连接到在检测电阻器上形成的差分信号。AFE 的单端输出

可简化连接到后续 ADC 的接口。差分放大器配置中的运算放大器通常便是用于满足该功能要求。专用电流检测放大器（例如 INA210）采用了集成增益设置组件，专为该类型的应用而设计。INA210 能够准确测量很小的信号，从而降低对检测电阻器的功率耗散要求。

下一个信号链块是 ADC，它用于将放大的传感器信号数字化。该器件可能需要额外的外部组件（基准、振荡器）以实现更精确的测量功能。与 AFE 类似，ADC 块也具有各种选项。您可以选择独立转换器搭配板载基准和振荡器的实施方式，也可以选择采用板载 ADC 通道的处理器。

集成式和分立式 ADC 块各有优势和限制。由于 ADC 集成到处理器中，因此一项明显的优势是组件更少。板载 ADC 通道的现有指令集进一步降低了对用于支持独立 ADC 的额外软件的要求。不过，数字控制器的硅工艺节点通常针对精密模拟的优化程度较低，这限制了板载转换器的性能。分立式模数转换器的

一项优势就是，允许根据优化的性能属性（如分辨率、噪声或转换速度）

来选择器件。

该信号链有一种变体，即使用 ADC 直接在电流检测电阻器上进行测量，从而完全无需电流检测放大器。标准转换器将会在取代 AFE 并直接测量分流电压方面面临挑战。其中一个挑战便是 ADC 的大型满标量程。

如果不对检测电阻器的压降进行放大，则无法充分

利用 ADC 的满量程，或者需要在电阻器上产生较大的压降。较大的压降将导致检测电阻器上产生较大的功率耗散。有些 ADC 具有经修改的输入范围，旨在直接测量

较小的信号，从而可以直接测量分流电压。这些器件中通常集成了内部可编程增益放大器 (PGA)，以利用 ADC 的满量程。

这些小信号转换器的一个限制是它们的共模输入电压范围有限。这些 ADC 的输入电压范围受到其电源电压（通常为 3V 至 5.5V）的限制，具体取决于所支持的核心处理器电压。INA226（如图 2 所示）是特定于电流检测的 ADC，可解决该共模限制问题。该器件具有 16 位 Δ-Σ 内核，可监测高达 36V 的共模电压轨上的小差分分流电 压，同时由范围为 2.7V 至 5.5V 的电源电压进行供电。

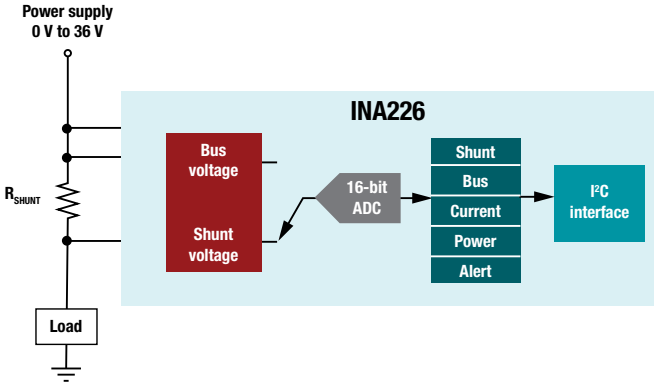


图 2：INA226 精密电流/电压/功率检测 ADC

INA226 与 ADC 类似（具有经修改的小输入范围），具有大约 80mV 的满量程输入范围，使器件能够直接在电流检测电阻器上进行测量。INA226 能够通过 2.5 μV 的最低有效位 (LSB) 步长和 10μV 的最大输入失调电压非常准确地解析小电流变化。0.1μV/°C 的失调漂移可确保较高的测量精度，在高达 125°C 的温度下，仅额外产生 12.5μV 的失调。凭借 0.1% 的最大增益误差，还能在满量程信号水平保持较高的测量精度。

尽管 INA226 能够精确测量小分流电压，但该器件还具有可用于电流检测应用的附加功能。该器件具有一个内部寄存器，用户可以使用印刷电路板 (PCB) 上的电流检测电阻器的特定值对其进行编程。通过获知电流检测电阻器值，INA226 可以在每次转换时直接将测量的分流电压转换为相应的电流值，并将其存储到附加的输出寄存器中。

INA226 还具有一个内部多路复用器：该器件可以从差分输入测量切换到单端电压配置，从而可以直接测量共模电压。利用电压测量以及之前测量的分流电压和相应的电流计算结果，该器件能够计算功率。该器件存储此功率计算结果，并通过双线串行总线向处理器提供该值以及分流电压、电流和共模电压信息。

除了片上电流和功率计算之外，INA226 还具有一个可编程警报寄存器，该寄存器可以将每个转换值与定义的限值进行比较，以确定是否发生了超出范围的情况。可以对该警报监视器进行配置，以测量超出范围的情况（如过流、过压或过功率）。该器件还具有可编程信号取平均值功能，以进一步提高测量精度。

INA226 经过优化，支持精密电流测量。器件中包含的其他功能可以支持必需的信号管理和监测，并减轻系统处理器的负担。

备选器件建议

对于性能要求较低的应用,INA230 仍可以利用专用电流检测模数转换器的优点。

对于测量的电流低于 15A 的附加精密测量功能,INA260 可提供与 INA226 类似的功能,同时还在封装中采用了精密 2mΩ 集成电流检测电阻器。

对于需要高得多的共模电压功能的应用,AMC1305 可提供

板载隔离,能够支持高达 1.5kV 的直流工作电压并处理高达 7kV 的峰值瞬态。对于 AFE 性能要求较低的应用,INA210 仍可以利用专用电流检测放大器的优点。

器件	经优化的参数	性能折衷
INA210	35µV 输入失调电压,封装:无引线四方扁平 (QFN)-10	无板载电流检测电阻器
INA226	10µV 输入失调电压,封装:迷你小外形尺寸封装 (MSOP)-10	无板载电流检测电阻器
INA301	信号带宽,板载比较器	无板载电流检测电阻器

表 1:备选器件建议

SBOA162C	“测量电流以检测超出范围的情况”
SBOA165B	“高压电源轨上的精密电流测量”
SBOA167A	“集成电流感应信号路径”
SBOA170B	“集成电流感测电阻”

表 2:相关的 TI 应用手册

使用非比例式磁性电流传感器进行精密电流感应设计

电子控制系统使用本地或远程传感器元件监控工作参数,从而进行环路控制、诊断和系统反馈。这种信息的质量和准确性是系统性能和控制功能的关键限制因素。在过去,许多电子产品都无法很好地控制传感器电源电压和电压基准,因此使用比例式方法来减少由于参数波

动导致的误差。随着现代系统对模数转换器 (ADC) 等信号链元件电压基准的严格控制,TMCS1100 磁性电流传感器等非比例式传感器提高了噪声抗扰度、精度和设计灵活性。

电流传感器的线性传递函数如公式 1 所示,其中灵敏度 (S) 和零电流输出电压分别表示增益和失调电压。VOUT = IIN × S + VOUT, 0

在完全比例式器件中,灵敏度和失调电压都随电源电压的变化而变化,因此,满量程输入电流总会产生零电压输出或电源电压输出,如图 1 所示。

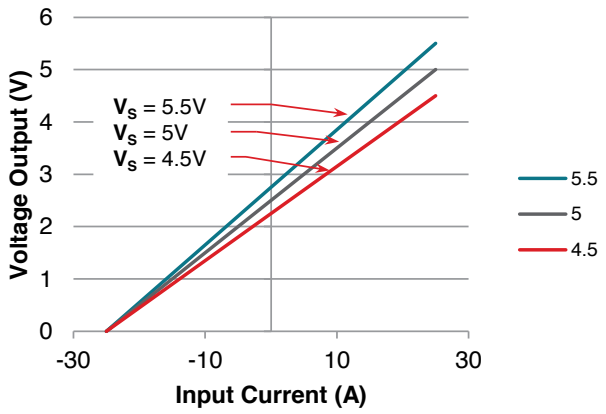


图 1. 完全比例式电流传感器响应

对于非比例式电流传感器,给定输入电流变化导致的电压输出变化与电源电压无关,而且零电流输出电压始终是固定电压,如图 2 所示。

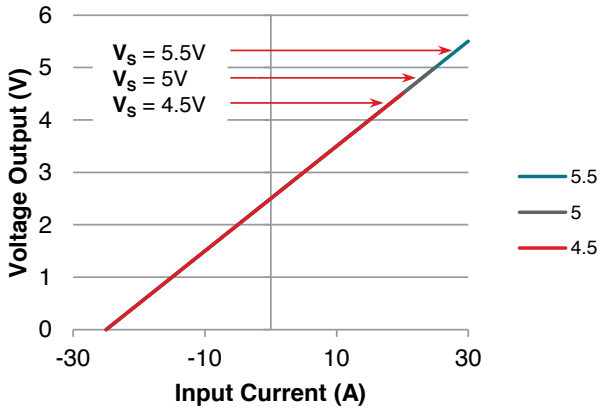


图 2. 非比例式电流传感器响应

如果常见传感器的电源与 ADC 基准在运行过程中与预期差异较大,则该系统为比例系统,如图 3 所示。比例式结构通过调整传感器输出范围,减少了由变化的 ADC

满量程基准导致的一些误差。然而,按比例调整并不是万全之策,它会向系统中引入一些其他误差。必须在有限电源电压范围内进行微调才能实现高精度,由于传感

器输出范围必须完全匹配 ADC 输入范围,设计灵活性会有所降低。另外,电源噪声会直接注入到输出信号,

进而导致不良的电源抑制 (PSR)。

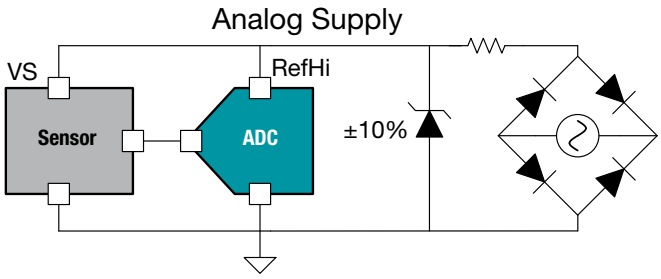


图 3. 适用于不易调节电源的比例传感器架构

对于具有稳定 ADC 基准的系统,无论是专用的内部电源还是外部基准,比例式方法都只会引入其他误差和噪

声。在这种情况下,例如在图 4 所示的架构中,具有固定灵敏度的电流传感器提供了出色的解决方案。凭借固

定的灵敏度,该器件具有显著的 PSR 作用,甚至电源电压与 ADC 满量程电压不同。集成式微控制器 ADC 通常就是这种情况。它还能优化灵敏度固定的内部电路,进而提高总精度并降低漂移。

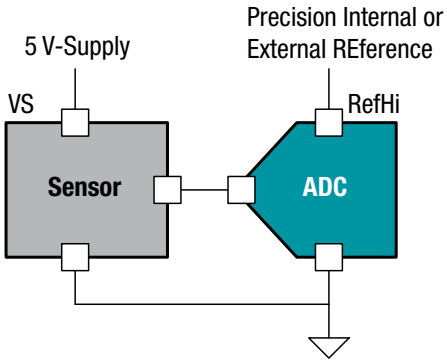


图 4. 适用于精密信号链的非比例式架构

TMCS1100 和 TMCS1101 是具有固定灵敏度的精密、隔离式磁性电流传感器。TMCS1100 具有由外部供电、设置零电流输出电压的基准引脚,既能自定义动态测量

范围,又能向 ADC 传输全差分信号链,如图 5 所示。此架构连同灵敏度固定的精密信号链实现了业界领先的

温度稳定性,而且在 –40°C 至 125°C 范围内的精度大于 1%。

电流传感器常用于电力系统中,其中,传感器通常靠近

电源开关元件,远离 ADC 和控制器。这导致开关噪声和瞬态事件与模拟电源和信号直接耦合。具有外部基准的固定灵敏度传感器能使系统抑制上述两种噪声路径。

改进的 PSR 通过模拟电源和外部基准抑制噪声注入,从而实现伪差分或全差分感应并抑制噪声与输出信号耦合。由于差分测量可防止零电流输出电压产生任何漂移,因此,降低了系统级噪声并提高了动态范围。

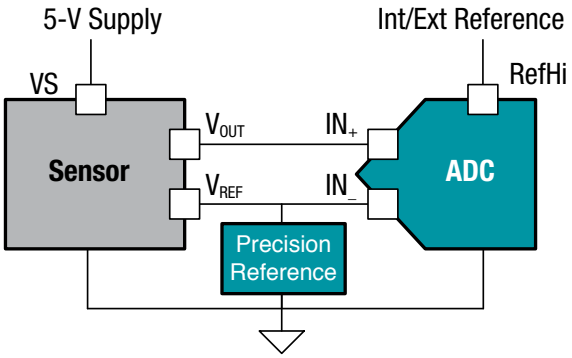


图 5. TMCS1100 经优化的信号链

由于可根据任何用例情况定制零电流输出,此架构显著提高了设计灵活性。通过选择适当的基准电压,可实现双向、单向和自定义动态感应范围。由于传感器电源、

基准和 ADC 基准之间无约束,传感器输出在无需调节的情况下即可跨越电压电源范围。

TMCS1101 具有提供基准的内部电阻分压器,具有50%/10%电源电压两种型号,分别适用于双向和单向电流感应。该器件具有 固定的灵敏度,而且在整个温
度范围内的精度大于 1.5%。

文档类型	标题
应用手册	《低漂移、高精度、直插式隔离磁性电机电流测量》(SBOA351)
应用手册	《集成电流感应信号路径》(SBOA167)

表 1. 相关技术手册

第 5 章：宽 VIN 和隔离式电流测量

将差分输出（隔离式）放大器连接到单端输入 ADC

无论您是检测工业三相伺服电机系统、电动汽车电池管理系统还是光伏逆变器中的电流，通常都需要包含某种安全隔离方案。安全相关标准定义了与特定设计相关的终端设备特定隔离要求。确定所需安全绝缘级别（基本、补充或增强）需要考虑各种因素，具体取决于设备类型、所涉及的电压水平以及

设备的安装环境。

TI 提供了各种用于电压和电流

分流检测的隔离式分流放大器，可满足基本或增强型隔离要求。对于需要增强型隔离的应用，AMC1301 输出围绕 1.44V 共模电压变化的全差分信号，可以直接馈送到独立模数转换器 (ADC) 中（如图 1 所示），或者馈送到 MSP430™ 和 C2000™ 微控制器系列的板载 ADC 中。

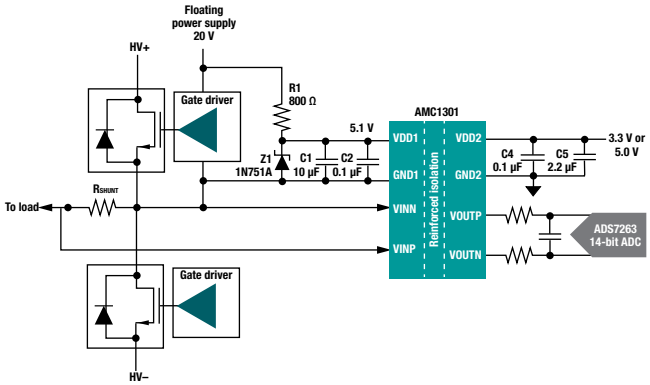


图 1：AMC1301 功能方框图

嵌入式 ADC

MSP430 和 C2000 处理器系列都具有嵌入式单端输入 ADC - 因此问题

变为“如何将该差分信号传输到我的单端数据转换器中？”为达到这一目标，最简单的方法是仅使用 AMC1301 的一个输出，将第二个输出悬空。该解决方案的缺点是数据转换器只能使用一半的输出电压摆幅，从而降低了测量的动态范围。AMC1301 的模拟输入范围是 ±250mV。在 8.2 的固定增益下，VOUTN 和 VOUTP 电压为 ±1.025V，围绕 1.44V 共模输出电压变化，如图 2 所示。差分输出电压为 ±2.05V。

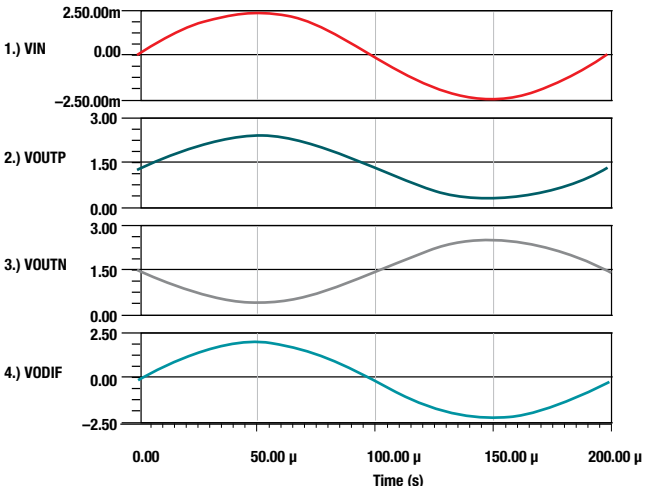


图 2：差分输出电压

通过添加差分转单端放大器输出级（如图 3 所示），使 ADC 能够实现 AMC1301 的整个输出范围。

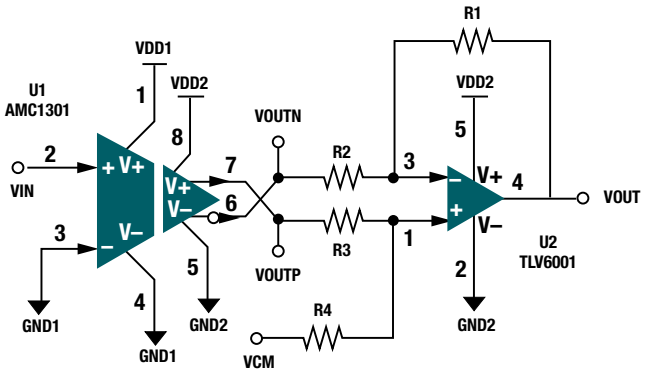


图 3：差分转单端输出

假设在 VIN 处施加 ±250mV 的满量程

正弦波，AMC1301 的内部增益将在相位差为 180 度的 V

OUTP 和 VOUTN 点提供 2.05V 的峰峰值输出。这些信号

之间的差值 VODIF 具有 4.1V 的峰峰值。当 R1 = R4

且 R2 = R3 时，公式 1 显示了输出级的传递函数：

$$VOUT = VOUTP \times \left(\frac{R4}{R3}\right) + VOUTN \times \left(\frac{R1}{R2}\right) + VCM$$

在公式 1 中为 R1 至 R4 使用等值电阻器并将 VCM 设

置为 2.5V，则公式 1 简化为公式 2：

$$VOUT = (VOUTP - VOUTN) + VCM$$

图 4 显示了 AMC1301 的输入和输出电压，

最终差分转单端输出级的输出电压。全新

差分电压可转换为 0.5V 至 4.5V 的单端信号。

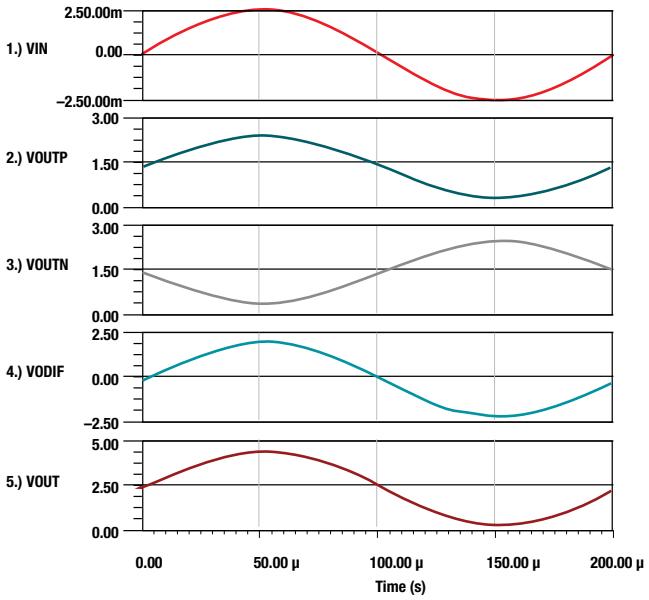


图 4：单端输出电压

根据 ADC 的输入电压范围，您可以将增益或衰减纳入

差分转单端级，以调整输出摆幅。输出共模电压是可

调的，以供同时满足 ADC 的输入需求。

设计示例

大多数 MSP430 器件上的嵌入式 ADC 在使用内部电压

基准时的输入电压范围为 0V-2.5V。使用 AMC1301 的

VOUTP 将为 ADC 提供 0.415V 至 2.465V 的输入信

号，该信号完全处于转换器的输入范围内，同时仅使用

AMC1301 的一半输入范围。如图 5 所示，通过使用增

益为 0.5 的差分转单端放大器配置

和 1.25V 的共模电压，AMC1301 的整个电压范围适用

于 ADC。

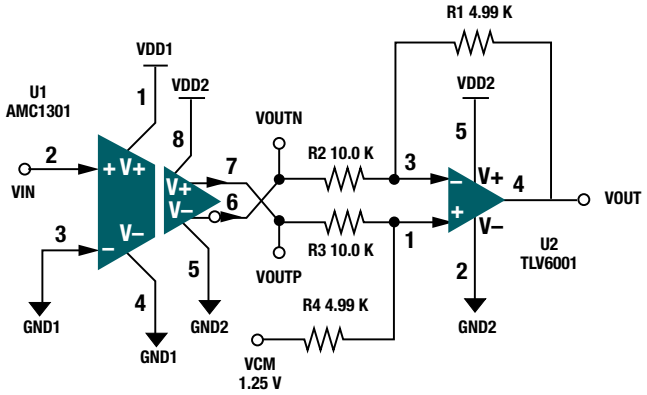


图 5：经缩放的 差分转单端输出

以 MC1301 的单个输出来驱动使 单端 ADC，但在输出端

添加 虽用 差分转单端运算放大器级可 然A 确保目标应用

具有最大的可

能动态范围。

备选器件建议

AMC1100 或 AMC1200 以较低的价格提供与 AMC1301

性

能类似的基本隔离。对于需要双极输出选项的应用，

TLV170 是很好的选择。

器件	经优化的参数	性能折衷
AMC1100	电隔离高达 4,250VPEAK	瞬态抗扰度更低
AMC1200	电隔离高达 4,250VPEAK	基本隔离与增强型隔离
TLV170	双极运算达 ±18V	输入偏置电流更高

表 1：备选器件建议

SBOA161B	“适用于三相系统的低漂移低侧电流测量”
SBOA165B	“高压电源轨上的精密电流测量”

表 2：相关的 TI 应用手册

突破分立式电流检测放大器的最大共模范围

对于高侧电源电流检测需求，您必须了解电源的最大电压额定值。最大电源电压将决定电流检测放大器的选择。电流检测放大器的共模电压应超过电源上的最大电压。例如，

如果您要在瞬态电压不超过 96V 的 48V 电源上测量电流，则需要设计一个最大共模电压支持 96V 的电流检测放大器。对于一个 400V 电源，您需要选择共模电压支持 400V 的电流检测放大器。

如果您需要实现小于 1% 精度的目标，那么高压、高侧电流检测的成本可能会很昂贵。对于高于 90V 的共模电压，电流检测放大器的选择通常

仅限于可能很昂贵且需要庞大物料清单 (BOM) 的隔离技术。但是，通过添加一些廉价的外部组件（如电阻器、二极管和 P 沟道金属氧化物半导体 (PMOS) 场效应晶体管 (FET)，可以将低压共模电流检测放大器扩展到超出其最大额定值。

采用电阻器的共模电压分压器

监测高压高侧电流检测的

最简单方法是在设计中采用具有外部输入电压分压器的低压电流检测放大器。例如，如果您为 80V 应用选择 40V 共模电压放大器，则需要

将 80V 输入共模电压

拆分为 40V 共模电压。您可以使用外部电阻分压器来拆分该电压，如图 1 所示。

不过，这是一种简单的设计方法，其优缺点很明显。

放大器的增益误差和共模抑制比 (CMRR) 取决于外部输入分压器电阻器的精度

和匹配度。除了增益误差和 CMRR 误差之外，外部电阻器的容差也会引起输入电压的不平衡，从而导致额外的输出误差。此误差会随温度的升高而增加，具体取决于电阻器的漂移规格。

一种最大程度地减小输出误差的方法是使用匹配 0.1% 精度的低温度漂移外部电阻分压器。

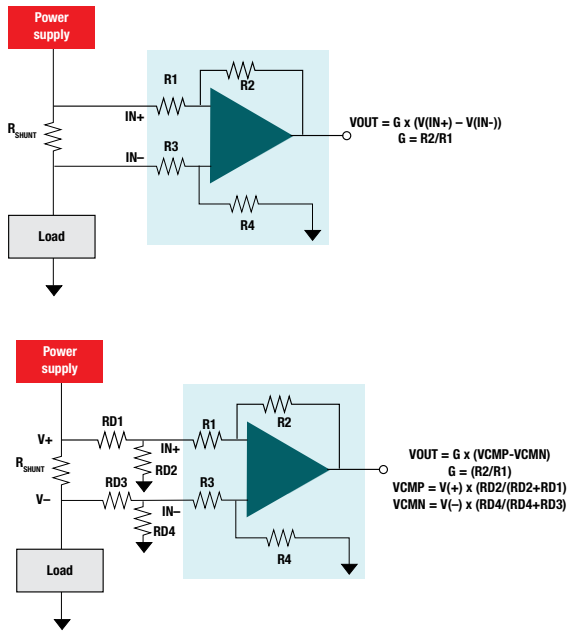


图 1：使用电阻器分压器扩展共模范围

扩展电流输出放大器的共模范围

由于分压器具有输出误差和性能下降的严重后果，因此另一种方法是将电流输出放大器的接地基准移到高压共模节点，如图 2 所示。图 2 允许在超出 INA168 额定共模电压 (60V) 的更高电压下进行电流检测。通过设计适当的 PMOS FET (Q1)，您可将此技术扩展到任何超过 60V 的电压。

在图 2 中，齐纳二极管 DZ1 用于调节电流分流监控器工作的电源电压，该电压会相对于电源电压浮动。DZ1 可在预期的电源电压范围（通常为 5.1V 至 56 V）内为 IC1 和 Q1 的组合提供足够的工作电压。选择 R1 可将 DZ1 的偏置电流设置为某个大于 IC1 最大静态电流的值。

图 2 中显示的 INA168 在 400V 时的最大额定值为 90μA。DZ1 中的偏置电流在 400V 时约为 1m A，远高于 IC1 的最大电流（所选的偏置电流值可以将 R1 中的耗散限制为小于 0.1W）。将 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) Q1 连接到共源共栅放大器，可将 IC1 的输出电流降至接地电平或更低。晶体管 Q1 的

额定电压应比总电源与 DZ1 之间的差值高几伏特，因为 Q1 源极上会出现向上电压摆动。选择 RL（IC1 的负载电阻器）时假设 IC1 是单独使用的。Q1 的共源共栅放大器连接可确保使用 IC1 时可远高于其正常的 60 V 额定值。图 2 中显示的示例电路是专为 400V 工作电压设计的。

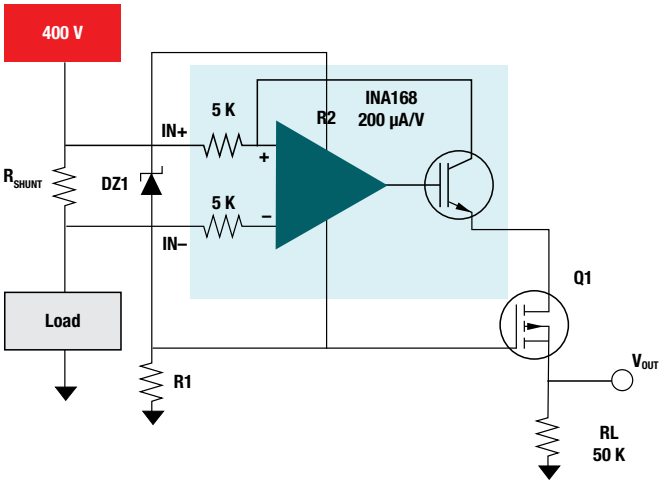


图 2：400V 系统的高侧直流电流测量

扩展功率监视器的共模电压范围

高压系统（40V 至 400V）的系统优化和功耗监控若经过精确实施，可以改善系统功耗管理和效率。了解电流、电压和系统功耗信息有利于诊断故障或计算系统的总功耗。监控故障和功耗优化可防止过早出现故障并显著降低功耗（通过优化系统关闭和唤醒）。

图 3 说明了如何在支持 40V 至 400V 系统的应用中采用 36V 共模电压功耗监控器件 INA226。

图 2 显示了用于将分流电阻器上的感应电压镜像到精密电阻器 R1 上的精密轨至轨 OPA333 运算放大器。OPA333 在其电源引脚之间使用 5.1V 齐纳二极管浮动高达 400V。该运算放大器用于驱动电流跟随器配置中的 600V PFET 的栅极。通过选择低泄漏 PF ET，即使在测量的低端也能获得准确的读数。

R1 上的电压可设置 FET 的漏极电流。通过使 FET 漏极中的电阻器 R2 匹配为等于 R1，R2 上将形成 VSEN SE 电压 (VR2)。INA226 电流监控器的输入端连接

在 R2 上，用于电流检测。因此，该电流监控器不需要高共模能力，因为它只能检测到在 VSENSE（通常小于 100mV）左右徘徊的共模电压。

INA226 是具有 I2C 接口的高精度电流/电压/功率监控器。INA226 还可以检测小于 36V 的总线电压。由于此处使用的总线电压为 400V，因此采用分压器将高压总线降压到 INA226 共模范围内的电压。采用 64 的比率后，总线电压的最低有效位 (LSB) 可以相应地增减，以获得实际的总线电压读数。在这种情况下，您可以使用

修改后的 80mV LSB。为分压器选择精密电阻器有助于保持总线测量精度。

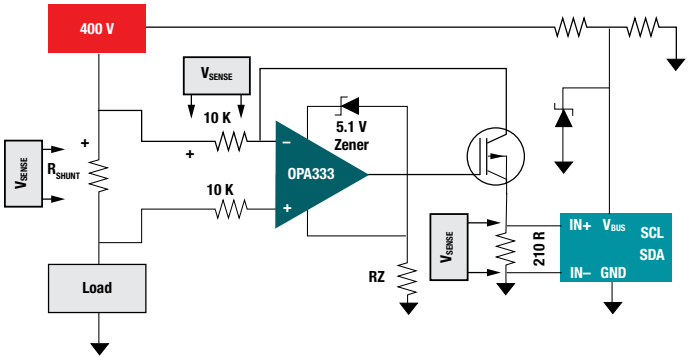


图 3：高压功耗监测

器件	经优化的参数	性能折衷
LMP8645HV	带宽：900kHz，封装：小外形晶体管 (SOT) -23-6	转换率: 0.5V/µS
INA220	迷你小外形尺寸封装 (MSOP)-8，I2C 接口，可选 I2C 地址	增益误差 (1%)、分流失调电压：100µV
INA139	封装: SOT-23，带宽：4,400kHz，成本	偏移电压: 1mV

表 1：备选器件建议

SBOA174A	“H 桥中的电流感应”
SBOA176A	“开关电源电流测量”
SBOA166B	“具有 PWM 抑制功能的高侧驱动、高侧螺线管监视器”

表 2：相关的 TI 应用手册

低温漂、高精度、隔离电流传感器在电机相线电流检测中的应用

随着提升系统效率的需求不断增长，我们面临着改善电机工作效率和控制功能的直接压力。几乎所有类型的电机均面临着这种需求压力，包括以下领域中使用的电机：

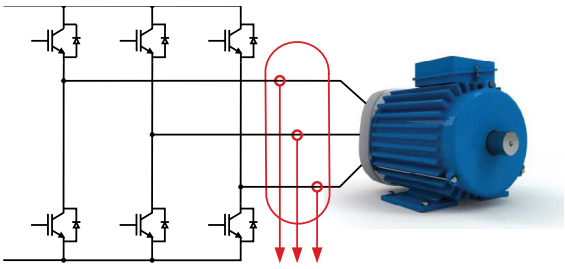
- 白色家电
- 工业驱动器
- 自动化
- 汽车 应用

在工作电压较高且具有较高功率的系统中尤其如此。对于确保电机以峰值效率和性能运行而言，反馈到控制算法中的电机运行特性至关重要。相电流是系统控制器使用的这些重要诊断反馈要素（用于实现最佳的电机性能）之一。

由于测量信号具有连续性并与相电流直接相关，因此测量电机电流的理想位置应直接与每个相位保持一致，如

图 1 所示。在其他位置（如每个相位的低侧）测量电流需要首先对数据进行重新组合和处理，以便控制算法使用有意义的数据。

图 1. 相线电流检测



电机的驱动电路可生成脉宽调制 (PWM) 信号来控制电机的运行。这些调制信号使与每个电机相位一致的测量电路经受很大的电压瞬变，这些瞬变每个周期在正负电源轨之间切换。理想的电流传感器能够完全抑制测量的共模电压分量，并且仅测量相关的电流。TMCS1100 等封装内磁性电流传感器使相电流流经封装引线框，从而产生内部磁场。然后，电隔离传感器测量磁场，从而在传感器 IC 和隔离的相电流之间没有任何直接电气连接的情况下提供电流测量。通过仅测量磁场，该传感器可隔离高共模电压，并提供出色的抗 PWM 开关瞬态性能。这可以实现出色的电机相电流测量，而不会由于较

大的 PWM 驱动输入电压阶跃而在传感器输出端产生不必要的干扰。图 2 显示了经过 RC 滤波的 TMCS1100 输出波形，以及电机相电压和电流波形。只能观察到由于测量寄生效应引起的微小 PWM 耦合，TMCS1100 输出跟踪电机相电流，而没有 300V 开关事件引起的明显输出瞬态。

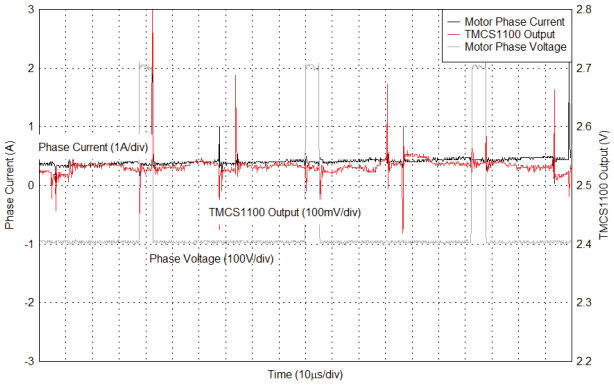
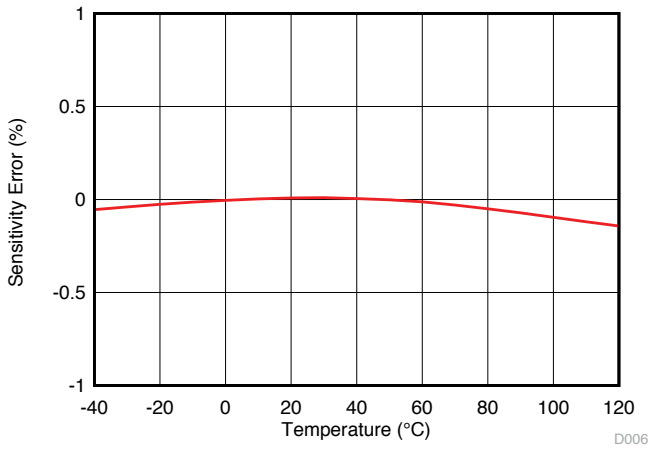


图 2. 具有高瞬态抗扰度的电机相电流测量

封装内磁性电流传感器的独特特性消除了测量电机相电流的替代解决方案所面临的许多挑战。固有的电隔离提供了承受高电压的能力，并且输出的高瞬态抗扰度降低了由于开关事件引起的输出噪声。没有该抗扰性的电流感应实现需要更高的带宽，以缩短输出干扰的建立时 间；磁性传感器可以使用较低带宽的信号链，而不牺牲瞬态抗扰性。由于不需要外部电阻分流器、无源滤波或相对于高电压输入的隔离电源，因此封装内磁性电流传感器还可以降低总体解决方案成本和设计复杂性。

对于 相电流 测量可提供过电流保护或诊断的应用，磁性电流传感器的高瞬态抑制可防止由于输出干扰而引起的错误过流指示。在使用闭环电机控制算法的电机系统中，需要进行精确的相电流测量以优化电机性能。过 去，基于霍尔效应的电流传感器具有很大的温度、寿命和迟滞误差，这些误差会降低电机效率、动态响应并引起非理想的误差（如转矩波动）。常见的系统级校准技术可以提高室温下的精度，但是说明参数（如灵敏度和失调电压）中的温度漂移是具有挑战性的。

德州仪器 (TI) 的磁性电流感应产品通过采用已获专利的线性化技术和零漂移架构（可在整个温度范围内提供稳定、精确的电流测量）来提高系统级性能。高精度传感器严格控制相间电流测量误差，从而保持精确的反馈控制并提供无缝的用户体验。

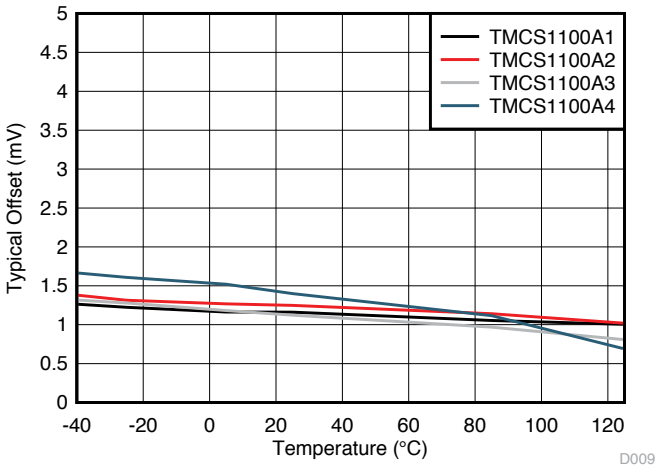


图图 3. 在在整整个个温温度度范范围围内内的的

TMCS1100 典典型型灵灵敏敏度度误误差差

TMCS1100 在 室温下 具有小于 0.3% 的典型灵敏度误差，在 –40°C 至 125°C 的整个温度范围内具有小于0.85% 的最大灵敏度误差。如图 3 所示，这种在整个温度范围内的稳定性通过最大程度地减小传感器的温度漂移提供了出色的相间匹配。除高灵敏度精度之外，该器

件还具有小于 2mV 的输出温漂（如图 4 所示），这极大地提高了测量动态范围，并且即使在轻负载下也可以进行精确的反馈控制。



图图 4. 在在整整个个温温度度范范围围内内的的

TMCS1100 典典型型输输出出失失调调电电压压

高灵敏度稳定性和低失调电压相结合，形成了业界领先的隔离式电流感应解决方案，此解决方案在该器件的整

个温度范围内具有小于 1% 的总误差。600V 的工作电压和 3kV 的隔离栅使该器件能够应用于各种高电压系统。TMCS1100 将测量温度稳定性、电隔离和瞬态PWM 输入抑制功能结合在一起，是需要精确且可靠的测量来实现精确控制性能的 PWM 驱动应用（如电机相电流测量）的理想之选。

器件	优化参数	性能折衷
TMCS1101	具有内部基准的磁性电流传感器	更低的精度、PSRR
AMC1300	增强型隔离分流放大器	解决方案尺寸、复杂性
INA240	具有 PWM 抑制功能的精密分流放大器	80V 功能隔离
INA253	具有 PWM 抑制功能的精密集成分流放大器	80V 功能隔离、尺寸

表 1. 备选器件建议

文献编号	标题
SBOA340	比例式与非比例式磁信号链
SBOA160	具有 PWM 抑制功能的低漂移、精密直列式电机电流测量
SBOA161	适用于三相系统的低漂移低侧电流测量
SBOA163	用于提供过流保护的高侧电机电流监测

表 2. 相关 TI 技术手册

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。

该平台标识和 C2000 是德州仪器 (TI) 的商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产

© 2020 Texas Instruments Incorporated

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及可靠性数据（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 © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司