

在电机控制、电磁阀控制以及电源管理（如 DC/DC 转换器与电池监控）等诸多应用中，高精度的高端电流检测都是必需的。在这种应用中，对高压侧电流而非回路电流进行监控，可以提高诊断能力，如确定对地短路电流以及连续监控回流二极管电流，避免使用取样电阻，保持接地的完整性。图 1、图 2 和图 3 分别给出电磁阀控制及电机控制的典型高压侧电流取样配置。

在上述所有配置中，监控负载电流的取样电阻上的 PWM 共模电压在从地到电源的范围内摆动。利用从电源级到 FET 的控制信号可以确定这个 PWM 输入信号的周期、频率和上升/下降时间。因此，监控取样电阻上电压的差分测量电路应具有极高共模电压抑制与高压处理能力，以及高增益、高精度和低失调——其目的是为了反映真实的负载电流值。

在使用单一控制 FET 的电磁阀控制中(见图 1)，电流始终沿同一方向流动，因此单向电流检测器就足够了。在电机控制配置中(见图 2 与图 3)，电机相位进行分流意味着取样电阻中的电流沿着两个方向流动，因此，需要双向电流检测器。

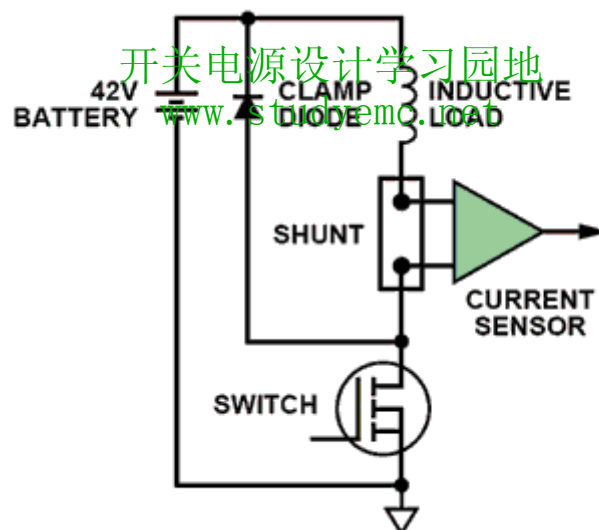


图 1 典型电磁阀控制中的高压侧分流

许多半导体供应商都为高压侧电流检测提供了多种方案。研究这类应用的设计工程师发现，这些方案都可以遵循两个截然不同的高压结构来进行分类：电流检测放大器和差动放大器。

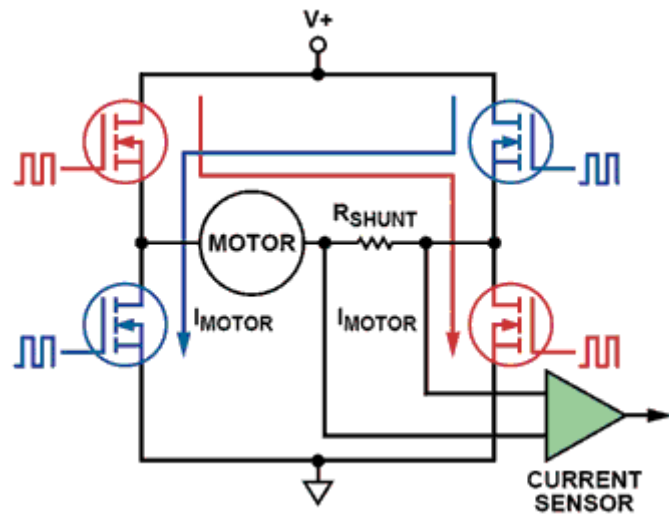


图 2 典型 H 桥电机控制中的高压侧分流

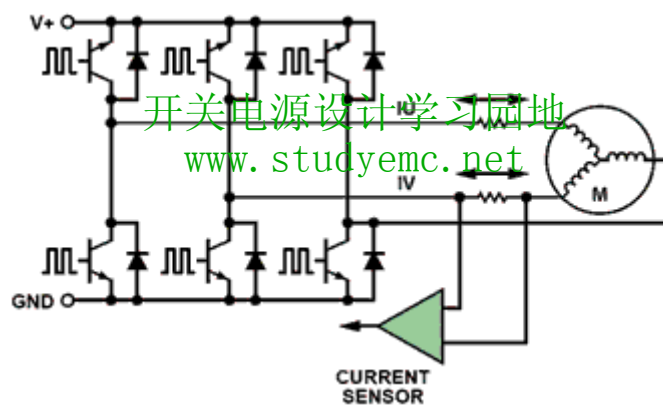
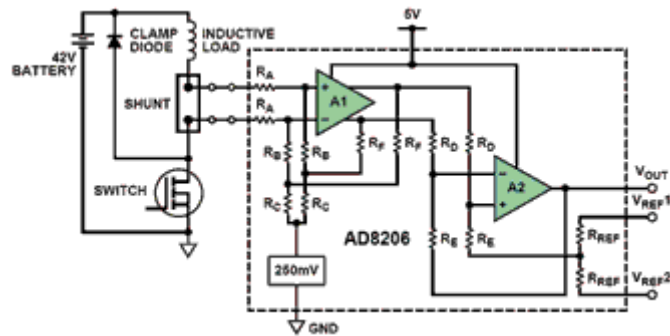


图 3 典型三相电机控制中的高压侧分流

接下来，我们将会详细介绍这两种架构的重要差异，以帮助高压侧电流检测设计工程师选择最适合应用的器件。我们将比较两个高压器件：双向差动放大器 AD8206 和双向电流检测放大器 AD8210。这两个器件具有相同的引脚，都具备高端电流取样监控功能，但其性能指标与架构却不同。那么，如何选择合适的器件呢？



## 它们如何工作

AD8206(见图4)是一款集成的高压差动放大器,通过内置输入电阻网络能够将输入电压削弱至 $1/16.7$ ,可承受高达 $65\text{V}$ 的共模电压,以使共模电压保持在放大器A1的输入电压范围内。但是,其内部的输入电阻网络也会使差分信号以同样比例衰减。为了实现AD8206的 $20\text{V/V}$ 增益,放大器A1与A2必须将差分信号放大大约 $334\text{V/V}$ 。

这个器件通过将输出放大器偏置到电源范围内的适当电压，来实现双向输入测量。电阻分压网络与放大器 A2 同向输入端连接，外部低阻抗电压施加到精密配置的电阻分压网络，来实现偏置。AD8206 的一个优异特性是：当共模电压为 -2V（相当于 250mV 的共模偏置电路，如图 4 所示）时，它能够正确地放大差分输入电压。

AD8210(图 5)是最近推出的一款高压电流检测放大器, 功能与 AD8210 一样, 并且引脚兼容。但是, AD8210 的工作方式与差动放大器不同, 其性能指标也不同。



电流检测放大器如 AD8210，采用如下方式放大小差分输入电压。输入端通过 R1 和 R2 与差分放大器相连。利用晶体管 Q1 和 Q2，可以调整流过 R1 和 R2 的电流，从而使放大器 A1 输入端的电压为零。当 AD8210 的输入信号为 0V 时，R1 和 R2 中的电流相等。当差分信号非零时，其中一个电阻的电流增加，而另外一个电阻的电流下降。电流差与输入信号大小成比例，极性相同。流过 Q1 和 Q2 的差分电流由两个精密调整的电  
阻转换成以地为参考的差分电压。接着，放大器 A2 利用低压晶体管——由其 5V(典型值)电源供电——对该电压进行放大，实现最终输出增益达到 20。

通常，只有输入共模电压保持在 2V 或 3V 以上时，这种架构的电流检测放大器才有用。不过，AD8210 内部的上拉电路能使放大器 A1 的输入保持在 5V 电源附近。因此，在共模电压以及器件的 5V 电源电压以下时，可以实现精确的差分输入电压测量。

显而易见，虽然电流检测放大器和差动放大器工作方式不同，却履行同样的功能。差动放大器将高输入电压衰减，使信号达到放大器可以接受的电平。电流检测放大器将差分输入电压转换为电流，然后再转换至以地为参考的电压；其输入放大器因采用高压制作工艺，能承受高共模电压。毫无疑问，两个架构的不同将导致其性能差异，设计工程师在选择高端电流检测解决方案时必须考虑这些性能差异。通常，厂商的数据手册已提供了大部分信息，可根据精度、速度、功耗及其他参数对器件的类型做出正确判断。然后，器件架构内在的某些重大差异是无法在数据手册中立刻发现的，但这些也是非常重要的设计考虑事宜。下面给出了一些工程师在实现最佳解决方案时必须考虑的关键点。

**带宽：**由于输入衰减，许多差动放大器的带宽通常为电流检测放大器的 1/5。不过，差动放大器较窄的带宽仍足以支持大多数应用。例如，许多电磁阀控制应用的工作频率不足 20kHz，而电机控制出于噪声考虑，通常必须在 20kHz 以上。通常，电磁阀控制检测平均电流，差动放大器的带宽非常适合这种应用。另一方面，对于电机控制来说，瞬时电流非常关键，尤其是测量电机相位时。因此，具有较宽带宽的电流检测器架构将更真实地反映实际电机电流。

**共模抑制（CMR）：**这两种架构之间输入结构的差异还导致 CMR 性能的不同。差动放大器通常具有精密跟踪精度高达 0.01% 的输入电阻。在直流电压时，这种匹配程度通常确保了 80dB CMR。而电流检测放大器因其晶体管输入结构，可以获得更佳的匹配，因此其 CMR 不再取决于输入电阻的匹配，通常可以达到 100dB 以上，除非共模电压较低。例如，AD8210 在输入共模电压低于 5V 时，能提供的 CMR 值与差动放大器一样，为 80dB。在这个电压范围下，由于其内部存在着上拉电路，输入结构具有电阻性，CMR 值与 0.01% 精密电阻匹配性相关。在整个范围内，电流检测结构将提供更好的共模抑制。

**外部输入滤波影响：**如果在高端电流检测应用中使用外部滤波，架构影响非常大。输入滤波器的目的是平滑输入噪声和电流尖峰，结构通常如图 6 所示。

## 开关电源设计学习园地

[www.studyemc.net](http://www.studyemc.net)

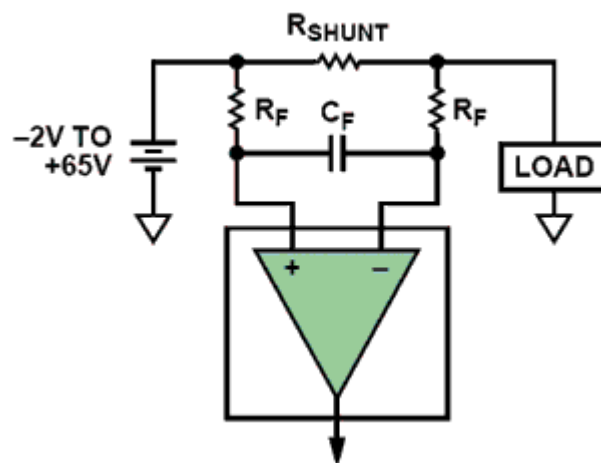


图 6 输入滤波器

差动放大器的输入阻抗大于  $100\text{k}\Omega$ 。对于 AD8206， $R_{in}=200\text{k}\Omega$ ，如果使用  $200\Omega$  滤波器电阻，额外增益误差将在 0.1% 以内。假设电阻的公差是 1%，这些外部元件带来的共模误差将达 -94dB，但可以忽略不计。

虽然电流检测放大器具有高得多的共模输入阻抗，为了将差分输入电压转换为电流，其串行输入电阻通常低于  $5\text{k}\Omega$ 。对于 AD8210 来说，差分输入阻抗  $R_{in}=3.5\text{k}\Omega$ ，在这种情况下，滤波电阻带来的附加增益误差可能高达 5.4%！同时，假设外部电阻失配的最差情况，CMR 能下降到 59dB。对于最大整体误差低于 2% 的器件性能来说，这是非常大的影响。

因此，在电流检测架构中引入输入滤波器要非常谨慎。当内置电阻在  $5\text{k}\Omega$  以下时，应当使用阻值低于  $10\Omega$  的滤波器电阻，这将确保电流检测放大器的原始高精度。差动放大器可采用的输入滤波电阻阻值范围较宽，因为其内部的高阻值输入电阻网络受外部失配的影响较小。

**输入过驱动：**在高端电流检测应用中，设计工程师必须认真考虑可能使放大器工作在指定范围以外的潜在事件。在典型应用中，虽然流经取样电阻的负载电流仅数百毫伏，但放大器的输入结构不同，在输入电压为若干伏特的故障情况下，器件是否还能正常工作？在这种情况下，差动放大器架构具有更强的鲁棒性，一旦系统次序后退，更可能继续如期地履行功能。输入电阻网络可以简单的将电流流向接地端；在 65V 时，AD8206 的输入端阻抗是  $200\text{k}\Omega$ ，则流向接地端的电流是  $325\mu\text{A}$ 。

如果使用电流检测放大器架构，设计人员还必须考虑这种潜在问题。在第一个例子情况下，当输入电压大幅摆动时，像 AD8210 这样的放大器是无问题的。通常，差分放大器输入端通常包含静电放电（ESD）保护二极管。利用大于 0.7V 的压差，可以使这个二极管正偏。这个二极管的实际断点是变化的，但大的差分电压（如来自汽车电源），通常会给放大器带来损害。

**负压保护：**在许多情况下，必须保护电流检测器免受反向电源电压的损坏，尤其是在汽车应用中。差动放大器的电阻桥输入可能是重要因素。不过，设计工程师必须核对器件的绝对额定值，以确保输入 ESD 二极管仅在较大负压下导通。

不过，在这种情况下，电流检测架构并不是最优的，因为输入放大器及其相应的输入晶体管将直接与大的负压相连。因为输入信号不应当受大的输入负直流电压的影响，因此，电流检测放大器的输入 ESD 二极管通常设计成仅在指定输入电压范围的低端以外导通。

除了直流负压，这种电流检测器还容易受到负的输入瞬态负流的影响。在 PWM 系统中这是一种常见情况，其中电流取样检测器随着内部 FET 开关导通与关断，其输入共模电压从地到电源电压之间摆动。同样，也必须认真考虑最大绝对额定值，这些值主要由放大器输入 ESD 二极管决定。和以前一样，差动放大器受到高输入电阻的保护，从本质上讲是阻止负的瞬态电流进入。因此，ESD 二极管通常设计为能够钳位大的负电压。但是，当采用电流检测架构时，在每个短路瞬间，负瞬态电流能启动输入 ESD 保护，而通常的设计

是：当输入电压接近放大器输入共模额定值时，启动输入 ESD 保护。虽然这种大小的脉冲一般不会损坏 AD8210 放大器 ESD 单元，但这方面的性能因器件不同而异。为了确保不会出现错误，在实际系统中应当对这个参数进行测试。

**输入偏置电流：**在电源管理非常重要以及必须考虑少量泄漏的应用中，两种架构中的不同输入结构都要求考虑输入偏置电流。例如，在电池电流检测系统中，两个架构都可以监控高压侧电流。不过，当系统关断且电流检测器的电源关断时，虽然输入仍然与电池相连，差动放大器(如 AD8206)内部电阻网络中的固有接地线路将需要偏置电流，以持续耗尽电池电流。另一方面，由于输入共模阻抗非常高(AD8210 输入共模阻抗 $>5\text{M}\Omega$ )，采用电流检测架构的放大器不会耗尽电池，因为在输入到接地的路径中几乎没有电流。

## 结论

在汽车、电信、消费电子和工业应用中，高压侧电流检测是一种广泛的需求。现在市场上销售的集成高压差动放大器和电流检测放大器都可以实现这种功能。根据应用中的精度和性能要求，系统工程师需要认真考虑哪种类型的电流检测器最适合其系统。

两种类型的电流检测器都可以工作，但不同架构的优势和缺点与器件特有的指标折中。对于瞬态电流监控，宽带宽的电流检测放大器最适合，但差动放大器更适合监控平均电流。此外，电流检测放大器具有最小的输入电源关断偏置电流泄漏，因此非常适合对电流消耗敏感的电源管理应用。不过，采用外部滤波器时，高压侧电流检测放大器的输入结构可能限制性能并要求仔细检查，以确保在恶劣应用环境使用时不超过绝对输入额定值。