

基于“零漂移”仪表放大器的传感器电路优化方案

传感器测量通常是将感兴趣的物理现象转换为电子电路参数，如电阻和电容，然后再用桥电路进行读取。桥电路再产生与温度和电源电压成比例关系的输出电压或电流信号，从而使测量系统免受温度和电源电压等因素变化的影响。传感器例子包括：用于温度检测的热敏电阻、用于压力检测的电阻/电容应变仪、用于方向/位置检测的磁阻传感器。

直接可以产生信号电压或电流的传感器不需要用桥电路来转换物理参数。这种传感器例子有热电偶、基于 ECG 的医疗仪器以及电源监测电路中测量电压的电流检测电阻等。

目前的传感器应用范围广，从消费类电子(温度计、压力计、GPS 系统等)到汽车电子(燃油传感器、爆震传感器、刹车线路传感器和车窗防夹控制等)，工业和医疗仪器(阀位置检测、基于温度的系统校准和心电图仪等)。这些工作环境充满了 EMI 噪声、电源谐波、地环路电流和 ESD 脉冲，而待提取的目标信号却相对很小。

因此，模拟传感器接口变得非常重要，必须在抵消这些环境效应的同时遵守严格的规范要求。为实现成功商用，传感器必须具有低成本、小体积以及低电流(针对电池供电的测量设备)特性。

系统设计师喜欢将模拟链路设计得尽可能短，希望以此来提高信号抗外部噪声的能力(数字电路通常对噪声不敏感)。过长的模拟链要求在后续电路中使用特定的信号处理电路。

例如一级电路提供差分增益，但没有共模抑制;另一级电路提供共模抑制，但没有差分增益。双路电源和高电压轨还有助于减轻对模拟电路的信噪比要求。对更短模拟链以及单电源、低电压、模拟电压轨的要求迫使人们开发创新的架构来满足这些挑战。

因此，在系统设计之初就要作出的一个决策是模数转换器(ADC)和传感器之间是否直接连接。这种直接连接在某些应用场合具有很大的优势。

例如，高阻比例桥可以采用许多 ADC 中包含的基本内部参考，而且一些现代 ADC 包含有高阻缓冲器或 PGA，它们可以用来隔离传感器信号与加载信号及 ADC 采样电路引起的电流脉冲信号。

但另一方面也存在使用仪表放大器(IA)连接传感器和 ADC 的实际例子，其原因是：

1. 在靠近信号源的地方将小信号放大可以改善一些应用的总信噪比，特别是当传感器不靠近 ADC 时。
2. 许多高性能 ADC 没有高阻抗输入端，因此需要低源阻抗放大器的驱动才能充分发挥它们的性能。在这种情况下如果没有中间放大器，输入电流尖峰和源阻抗失配等异常情况将带来增益误差。
3. 外部放大器能帮助用户针对应用优化信号调节(滤波)。
4. 用于制造 ADC 的最佳半导体工艺并不一定是用于制造放大器的最佳工艺。
5. IA 提供的增益使传感器和 ADC 之间的接口更加容易，因为它不仅可以减轻系统设计压力，还能降低总体系统成本。例如，读取一个无增益的传感器信号比读取放大的传感器信号需要更高的分辨率和昂贵的 ADC。

低偏移仪表放大器的好处

当使用 IA 读取传感器信号时经常会遇到各种直流误差问题，主要根源是输入电压偏移效应。事实上，引起直流误差的其它每个根源都是根据输入偏移电压进行建模的，其中直流

CMRR 代表直流输入偏移电压随输入共模电压的变化，直流 PSRR 代表直流输入偏移电压随电源电压变化而发生的改变。

即使 VOS 可以在制造过程中得到校准，但输入偏移电压(随温度和时间)的漂移要比初始直流偏移本身更重要。这种漂移误差最好是通过使用芯片内的有源电路来解决。

也许引起直流误差的最重要根源是噪声，而噪声是半导体芯片设计和工艺中所固有的。因为大多数传感器信号被高增益模块所放大，以输入信号为参考的噪声也被放大同样的增益。噪声有两种形式：粉色噪声(也称为 $1/f$ 或闪烁噪声)和白色噪声。粉色噪声在低频段(小于 100Hz 左右)更重要，白色噪声一般决定了信号带宽更高的芯片性能。

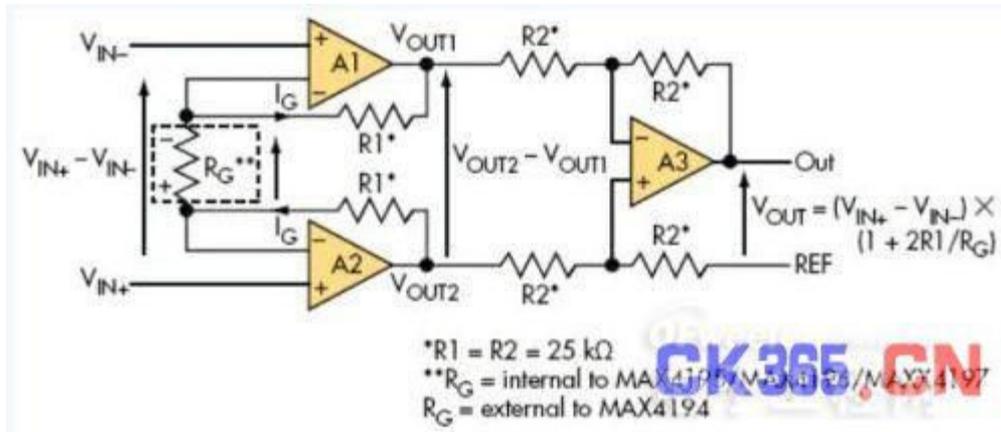
在传统的低噪声模拟电路设计中通常选用双极晶体管设计输入级电路，特别是在必须实现低的粉色噪声电平情况下。

粉色噪声是由于半导体表面上的缺陷点处发生的重组效应引起的。因此与双极器件产生的噪声相比，CMOS 器件的噪声具有更大的幅度和更高的角频率。(噪声角频率是指粉色噪声密度与白色噪声密度相等时的频率)

大多数传感器选用高阻抗输入，这迫使 IA 采用 CMOS 前端，从而使设计师必须面对随之而来的更高低频噪声电平。幸运的是，能够连续补偿输入偏移电压的零漂移电路设计技术可以用来消除低频输入粉色噪声。

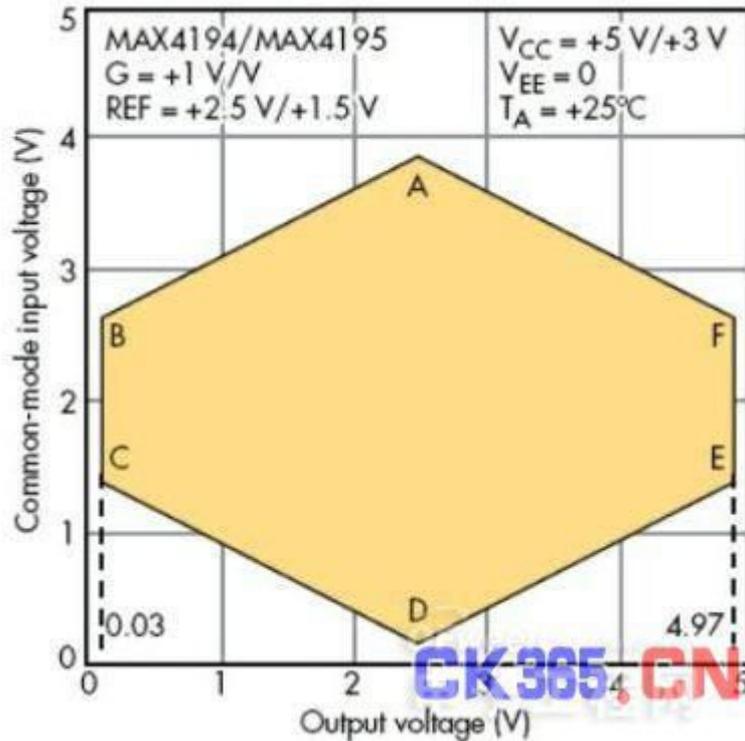
流行的新架构

传统 IA 使用三个运放搭建成一个输入缓冲级和一个输出级电路(图 1)。输入缓冲级电路提供全部差分增益、单位共模增益和高阻抗输入，差分放大器输出级提供共模增益为零的单位差分增益。这种 IA 可以用于许多场合，但它的简单性掩盖了两个重要的缺点：可用的输入共模电压范围有限，交流 CMRR 也有限。



在传统的三运放仪表放大器中，输入缓冲级电路提供了所有的差分增益、单位共模增益和高阻抗输入。

基于三个运放架构的 IA 仅具有有限的传输特性(图 2)。在输入共模和输入差分电压的某种组合条件下，这种架构中的缓冲放大器 A1 和 A2 的输出很容易达到电源电压轨而饱和。在这种状况下，IA 将无法抑制输入共模电压。

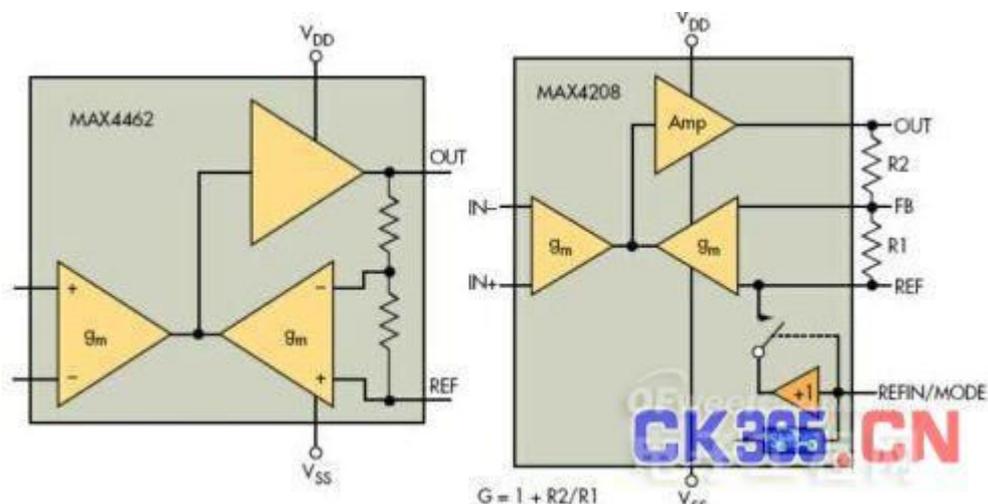


仪表放大器在不同共模电压处的有限传输特性(在高增益处眼图有所压缩)。

因此,大多数三运放 IA 的数据手册都给出了可用的输入共模电压对输出电压的曲线图。因为输出电压只是按比例缩放的输入差分电压,因此这种图中的两个轴也可标记为“输入共模电压对输入差分电压”。六边形内的灰色区域代表了“有效”工作区,在这个区域内放大器 A1 和 A2 的输出不会饱和至电源电压轨。

请注意,图 2 所示的图形对单电源应用有重要的含义。共模电压很容易接近电路地电平,这是灰色区域不能延伸到的地方!因此某些应用(如低边电流检测)不能使用传统的三运放 IA,因为它们的输入共模电压等于地电平。

三运放 IA 可以通过匹配差分放大器周围的片内电阻而获得较高的共模抑制性能,但这种 IA 的反馈架构将大大降低交流 CMRR。为克服这些缺点,业界开发出另一种 IA 架构,例如 2gm 间接电流反馈方法(图 3)。



IA 的间接电流反馈架构由两个匹配的跨导放大器和一个高增益放大器组成。

这种架构由两个匹配的跨导放大器和一个高增益放大器组成。这两个匹配的放大器的 gm 的相同，在输入端将产生相等的差分电压，因此输出电压取决于电阻分压比 Rf/Rg。输出共模电压通过 REF 引脚上的电压设定。由输入 gm 放大器实现的电压到电流转换电路天生就能抑制输入共模电压，从而使放大器具有高的直流和交流 CMRR。

即使输入共模电压等于负电源电压轨，间接电流反馈 IA 架构也能实现满幅输出电压，因此这种间接电流反馈 IA 的工作范围要比三运放 IA 架构宽得多。美信集成产品公司(Maxim)的 MAX4460/1/2 和 MAX4208/9 便是这类 IA 产品。

偏移抵消技术：跟随漂移？

IA 的两个重要指标是粉色噪声(也称为 1/f 或闪烁噪声)和输入偏移电压及其相对温度和时间的漂移。1/f 噪声是一种低频现象，许多用于实现“零漂移”和输入偏移电压抵消的电路技术同样能消除 1/f 噪声。这些技术包括采样放大器、自动调零放大器、斩波放大器、斩波-稳定放大器以及斩波-斩波-稳定放大器(如 MAX4208)。

IA 也能采用基于飞跨电容的采样技术实现输入偏移电压的自动校正。然而，因为用于采样的输入端不是真正的高阻抗结构，所以源阻抗的失配很容易降低系统级的精度。

应用实例

下面介绍两种 IA 应用，一种是比例桥电路，另一种是低边电流检测放大器。

1.比例桥

比例桥是标准桥测量系统的一个变种，它能提供同样高的精度，但成本更低。成本低的原因是比例桥不需要用高精度的参考源驱动桥和 ADC 参考输入，一个“自由”但相对精度不高的高 ppm/°C 参考信号源就可以同时驱动桥和 ADC。

众所周知，即使具有“轨到轨”输出的运放在驱动其输出到数百毫伏的任一电压轨时也很难保持最大精度。因此，对具有高动态范围和单极信号输入的放大器来说，有必要将输出偏置在大于地电平约 250mV 左右。这种偏置电压需要驱动电阻链的一端，因此必须加入低输出阻抗的缓冲器进行驱动，以免引入不必要的增益误差。为尽量减小输出误差，这种单位增益运放缓冲器也应具有低直流偏移和低漂移特性。

MAX4208 仪表放大器在小型 μMAX 封装内集成了一个高精度的零漂移运放缓冲器和一个 2gm 的间接电流反馈 IA，其中的缓冲器允许用一个简单的外接电阻分压器建立稳定、与 ADC 参考电压成比例关系的偏置参考电压。该缓冲器还能驱动差分输入 ADC 的一个输入端。IA 内部的斩波-斩波-稳定架构可以同时消除主(前向)和反馈通道中运放缓冲器和放大器的粉色噪声效应。此外，MAX4208 还具有对功率敏感应用非常有用的断电模式。

2.完美的电流检测

如今的便携式电子设备对有效功率管理的需求越来越大，这重新引起了人们对电流检测放大器的兴趣。地电平检测 IA 可以用作存储器模块或微处理器的内核电压路径中的高边电流检测放大器(图 4)，也可以用作 H 桥功率电子转换器反馈路径中的低边电流检测放大器。

为检测计算机应用中的大电流，可以将地电平检测 IA 用作内核电压路径中的高边电流检测放大器。

这些应用中的电流特别高(有时接近 90A)，因此检测电压必须非常小才能避免在检测电阻上产生过多的功率损失。通常，这个检测电阻可能是电源电感本身的 ESR。为精确读取这个很小的检测电压，输入偏移电压与将被高精度放大的最小检测电压(即最小负载电流)相比必须非常小。

计算机硬件的内核电压可能在 0.9 到 1.5V 范围内变化，因此这种很小的检测电压必须在很低且不断变化的共模电压环境下测量。诸如 MAX4208 这样具有低 VOS、高 CMRR 且架构针对单电源应用专门优化过的 IA 就非常适合这种应用场合。