

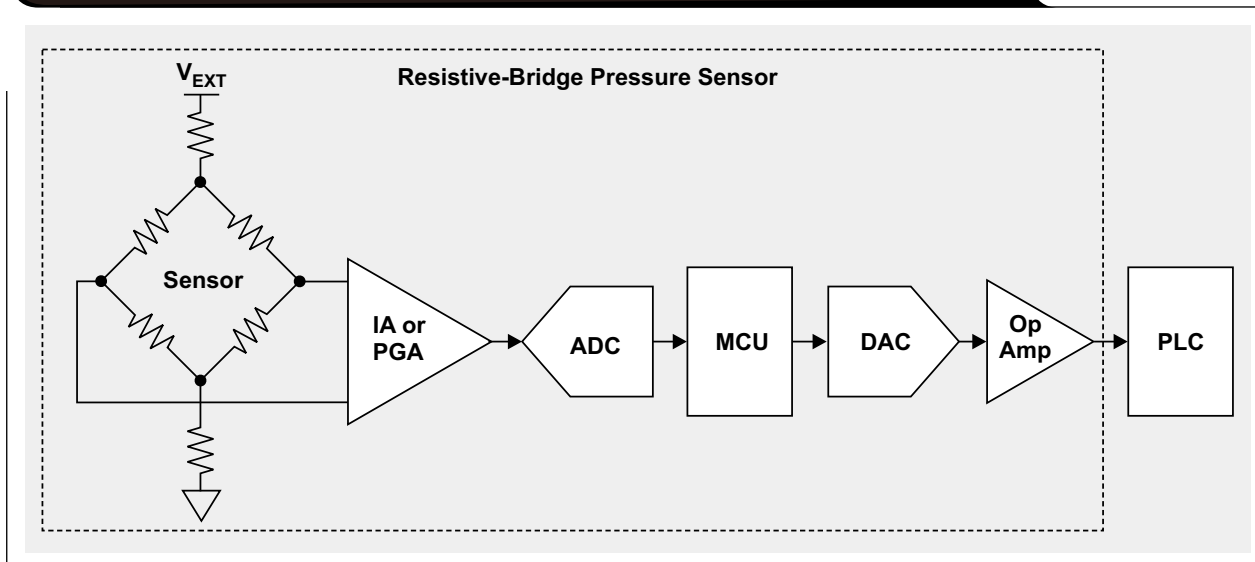
针对工业过程控制系统中的阻性桥压力传感器的设计小贴士

作者: Peter Semig, 应用工程师, 精密型模拟产品

Collin Wells, 应用工程师, 精密型模拟产品

Miro Oljaca, 高级应用工程师, 医疗、高可靠性与感测产品

图 1: 至过程控制系统的阻性桥压力传感器连接



引言

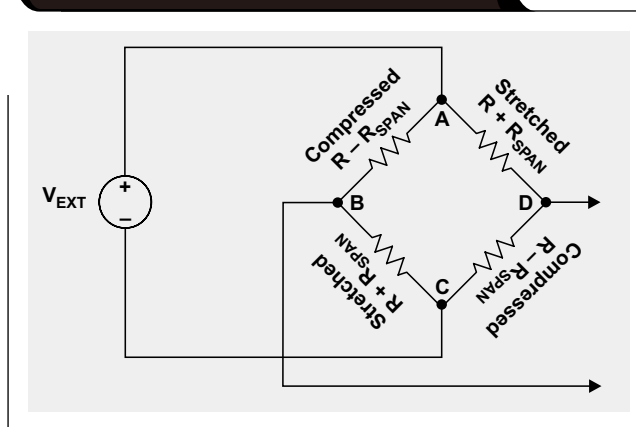
在工业自动化系统中有许多需要测量和控制的物理参数。温度、压力、流量和电平等只是此类物理参数中的区区几个而已。阻性桥传感器在这些应用中是常用的。图 1 给出了过程控制系统中使用的阻性桥压力传感器的典型示意图。本文阐述了阻性桥压力传感器每个功能部件的主要设计考虑因素。

传感器基础知识

工业过程控制系统常常使用阻性桥传感器来测量电阻的变化，其最终代表了诸如应变、压力、温度、湿度等物理参数的变化。虽然阻性桥拓扑的种类繁多，但惠斯通电桥（图 2）则是其中知名度最高和记录最详细的一种。

压力传感器中的每个电阻器被压缩或拉伸（图 2）。当把压力施加至传感器时，电阻 R_{AB} 和 R_{CD} 通过压缩而减小，而电阻 R_{AD} 和 R_{BC} 则经由拉伸而增大。电阻中的这

图 2: 施加压力的阻性桥传感器



些变化在差分电压中产生了一个变化 V_{BD} ，它被一个差分放大器所放大（图 1）。当与桥式传感器相连接时，设计人员常常使用具有非常大输入阻抗的差分放大器，如仪表放大器 (IA) 和可编程增益放大器 (PGA)。

共模电压与输出电压范围的关系

电桥的共模电压 (V_{CM}) 是存在于差分放大器输入端子上的平均电压。

$$V_{CM} = (V_{BC} + V_{DC})/2 \quad (1)$$

如果电桥是平衡的, 则 V_{CM} 为桥激励电压的一半, $V_{EXT} = V_{AC}$ 。例如, 倘若 $V_{AC} = 5\text{ V}$, 则 $V_{CM} = 2.5\text{ V}$ 。对于阻性桥传感器来说, 电桥的共模电压也许是最重要的设计考虑因素。这是因为 IA 的输出电压范围 (V_{OUT}) 取决于诸多的因素, 包括了共模电压、增益、基准电压、拓扑和电源电压。^[1] 作为一个例子, 图 3 示出了一款具有三个运算放大器 (运放) 的 IA 的 V_{CM} 与 V_{OUT} 关系曲线图。

回顾一下, 当 $V_{AC} = 5\text{ V}$ 时, $V_{CM} = 2.5\text{ V}$ 。对于单向传感器, 通常希望利用一个单 5 V 电源来给 IA 供电, 并把 V_{REF} 连接至 0 V (GND)。不幸的是, 这将限制 IA 的输出摆幅。以 INA826 为例, 我们在图 3 中注意到: 如果 $V_{CM} = 2.5\text{ V}$, 则输出仅能从 100 mV 摆动至大约 3.2 V 。因此, 当采用一个 5 V 基准电压时, 系统无法使用模数转换器 (ADC) 的最大分辨率。在该场合中, 可考虑采用一款可供替换的 IA、选择一个不同的电源电压和 / 或一个不同的 IA 基准电压、或者变更电桥共模电压, 如图 4 所示。

初始输入失调电压 (V_{OS})

初始失调电压是差分放大器的输入端子 (比如: 运放、IA、PGA, 等等) 之间的 DC 误差电压。对于具有三个运放的传统型 IA 而言, 该电压取决于器件的增益。^[2] 失调电压会增加解决方案的总失调误差, 而且假如不予以校正, 它还将使共模电压产生位移。因此, 具有非常低失调电压的零漂移 IA 或 PGA (如 PGA900) 可能是一种更好的选择。

零漂移这个术语适用于具有自动归零拓扑的斩波器或器件, 这种拓扑可针对诸如初始输入失调电压、输入失调电压漂移、电源抑制比 (PSRR)、共模抑制比 (CMRR) 及某些其他的失调误差进行内部校正。

输入失调电压漂移 ($\Delta V_{OS}/\Delta T$)

输入失调电压漂移是当温度偏离室温 (25°C) 时输入失调电压中的变化。这是初始输入失调电压以外的失调误差。由于大多数工业系统都必须在很宽的温度范围内保持准确度, 所以零漂移 IA 或 PGA 是首选方案。虽然初始输入失调电压可利用室温校准予以消除, 但是失调电压漂移则需要采用一种更加复杂且费时的过温校准例程来消除。必须在各种不同的温度条件下对每个单独的系统进行校准, 因为每个系统组件

图 3: INA826 IA 的 V_{CM} 与 V_{OUT} 关系曲线图

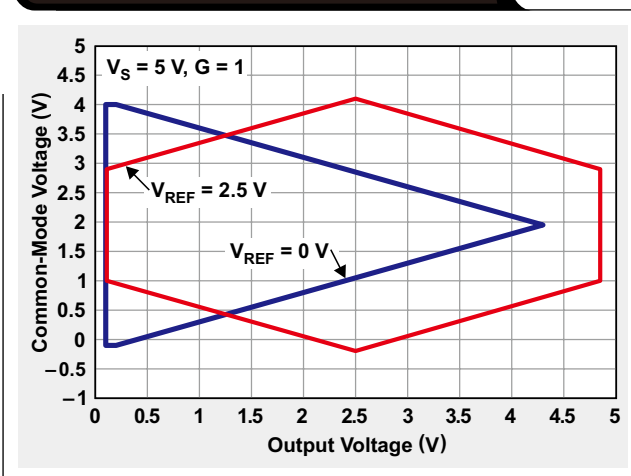
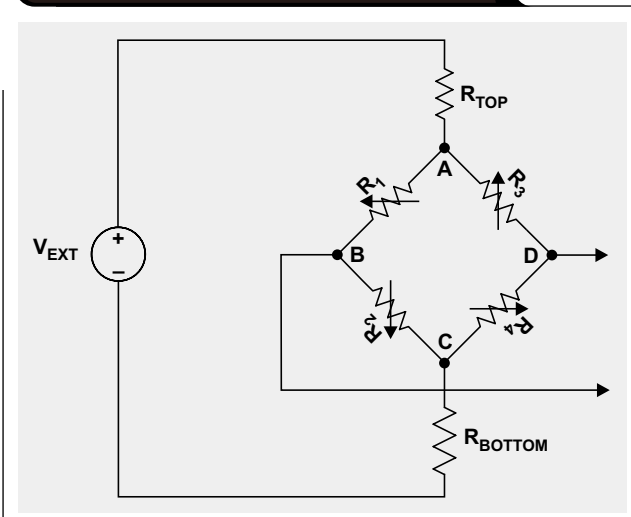


图 4: 通过增设 R_{TOP} 和 / 或 R_{BOTTOM} 来调节 V_{CM}



的漂移方向也许是不同的。在某些场合中, 如果系统校准只是在 25°C 温度下进行的 (而并未在其他温度条件下实施), 则整个温度范围内的误差实际上有可能增加。^[3]

噪声

当选择桥式放大器时, 放大器的固有噪声是一个主要关注的对象。人们特别感兴趣的是放大器的低频 (即 $1/f$) 噪声, 因为工业系统一般是低带宽的。由放大器产生的噪声与 ADC 的噪声相加, 最终将导致测量的无噪声分辨率下降。尽管零漂移放大器可能因其噪声频谱密度曲线的 $1/f$ 区域很平坦而成为首选, 然而某些非零漂移 IA 则或许拥有更好有总体噪声性能。应进行完整的噪声分析以确定放大器的整体噪声成分。

模数转换器

可采用高分辨率（24 位）增量-累加型模数转换器（ $\Delta \Sigma$ ADC）来测量阻性桥信号。一般地，此类 ADC 内置了一个调制器和数字滤波器。由于每样本位数极低，因此总体量子化能量对于 $\Delta \Sigma$ 调制器来说是非常高的。抽取器必须把高于奈奎斯特频段的频谱中不希望有的噪声滤除，这样噪声就不会经由抽取过程而混叠至基带之中。

在大多数 $\Delta \Sigma$ ADC 中实现的抽取滤波器是 Sinc 滤波器。这种滤波器拓扑因其固有的稳定性和易于实现的特点而广受欢迎。该 Sinc 滤波器的阶数和抽取比决定了 ADC 的性能。^[4]

ADC 的无噪声代码分辨率被定义为这样的分辨率位数，如果超过该位数将无法解析各个代码。ADC 的无噪声分辨率可根据总代码数量 (2^N) 和峰至峰噪声代码测量值来计算。

$$\text{无噪声代码分辨率} = \log_2 \left(\frac{2^N}{\text{峰至峰噪声代码}} \right) \quad (3)$$

有效分辨率可通过给无噪声代码分辨率计算值增加 $\log_2(6.6)$ （即大约 2.7 位）来计算。

$$\text{有效分辨率} = \text{无噪声代码分辨率} + 2.7 \text{ 位} \quad (3)$$

例如，PGA900 中的 $\Delta \Sigma$ ADC 具有一个工作于 1 MHz 采样频率的二阶调制器，以及一个采用 128 倍过采样的三阶 Sinc 滤波器。图 5 中示出的噪声性能针对的 7.8 kHz 输出数据速率、3.9 kHz 带宽和 384 μ s 阶跃响应时的情形。

应用额外的数字滤波

让该应用中所使用的 ADC 拥有远远高于所需系统带宽的数据速率是很常见的。因此，可运用额外的数字滤波以进一步降低 ADC 噪声，从而以牺牲输出数据速率为代价来换取无噪声分辨率的提高。

一个简单的平均滤波器可创建一个低通滤波器，其将使带内噪声降低 3 dB，并把测量分辨率提高 0.5 位（对于每两个被取平均的连续样本）。这在 (4) 式中进行了定义，式中的 M 是取平均的连续样本的数量，而 W 是输出信号分辨率的增加。

$$W = (1/2)\log_2(M) \quad (4)$$

由图 5 可见，40 dB 的增益将产生 13.84 位的无噪声输出分辨率。对 ADC 输出数据应用一个 M = 32 的滑动平均滤波器将使无噪声输出分辨率提升 2.5 位，如 (5) 式和图 6 所示。

$$W = (1/2)\log_2(32) = 2.5 \text{ 位} \quad (5)$$

图 5：在 7.813 kHz 输出数据速率条件下实测性能与增益的关系曲线

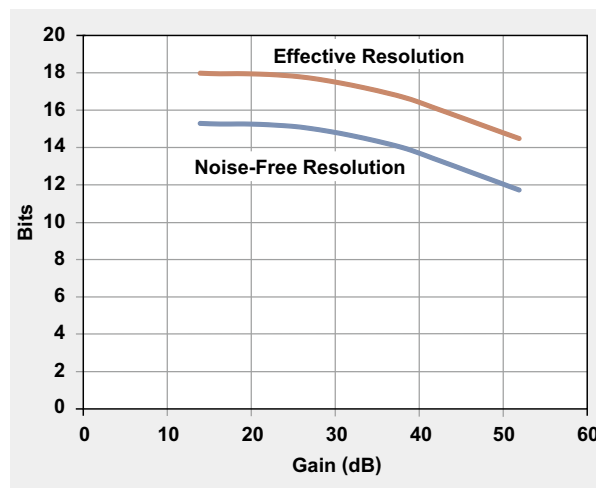
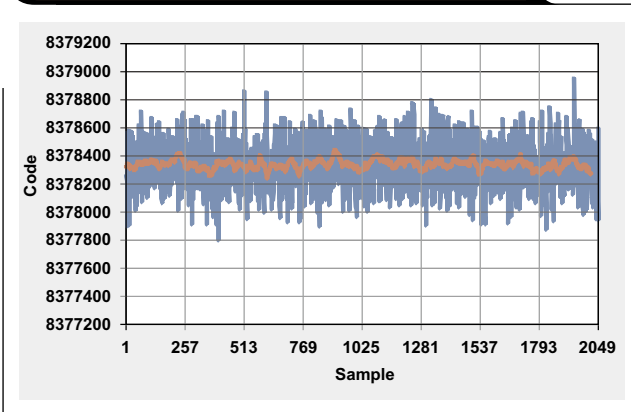


图 6：ADC 输出与滤波器输出的关系曲线



现在，输出无噪声分辨率从 13.8 位提高至 16.34 位。不过，输出信号的数据速率则从 7.8 kHz 降低至 244 Hz。

模拟输出级

一旦采集并处理了传感器信号，下一步则是创建一个用于代表零标度至全标度传感器测量值的线性模拟输出信号。线性传感器输出通过一个两线式电流环路或三线式电压输出信号（这取决于传感器发送器的要求）来传输。两线式传感器发送器的最常用输出范围为 4 至 20 mA，但是偶尔也会使用其他的输出范围。（接下页）

(续上页) 最常用的三线式电压输出范围为 0 V 至 10 V, 但也可实施其他的输出范围, 如 ±10 V、0 V 至 5 V 和 ±5 V。

模拟输出级的两个主要构件是一个数模转换器 (DAC) 和一个的运放电路, 其通过配置以建立期望的电流或电压输出范围。一定要使模拟输出级的性能与传感器采集电路的性能严密匹配; 包括分辨率、偏移、增益误差、非线性及噪声。

DAC 考虑因素

DAC 常常设定了模拟输出级的性能, 因此其选择必须谨慎仔细。虽然许多传感器发送器是采用 16 位 DAC 设计的, 但是分辨率要求较低的系统则可使用 12 位 DAC。与输入级和 ADC 相似, DAC DC 偏移、增益和漂移误差也可利用校准予以消除。

积分非线性 (INL) 误差无法借助标准的增益和偏移校准来消除, 而且它设定了校准后的准确度。于是, 应确定 DAC INL 规格远远低于期望的最终系统准确度。为了确保提供一个单调输出, 几乎总是要求差分非线性 (DNL) 规格小于 1 LSB。

两线式、4 至 20 mA 输出运放电路

图 7 示出了一款标准的两线式、4 至 20 mA、发送器运放电路。该电路需要一个具有非常低静态电流的运放, 以尽量减轻对于有限的两线式电源电流预算 (4 mA) 的影

响。通常使用一个线性电压调节器以降低 +24 V 回路电源电压, 从而允许采用低电压运放。

运放输入共模范围必须包括负电源轨。为了最大限度地增加可用的输出电压摆幅, 输出摆幅应包含两个电源轨。由于运放仅需驱动双极结型晶体管 (BJT) 的基极电流, 所以对输出电流的要求很低。4 至 20 mA 电流的大部分流过 BJT (从集电极至发射极)。

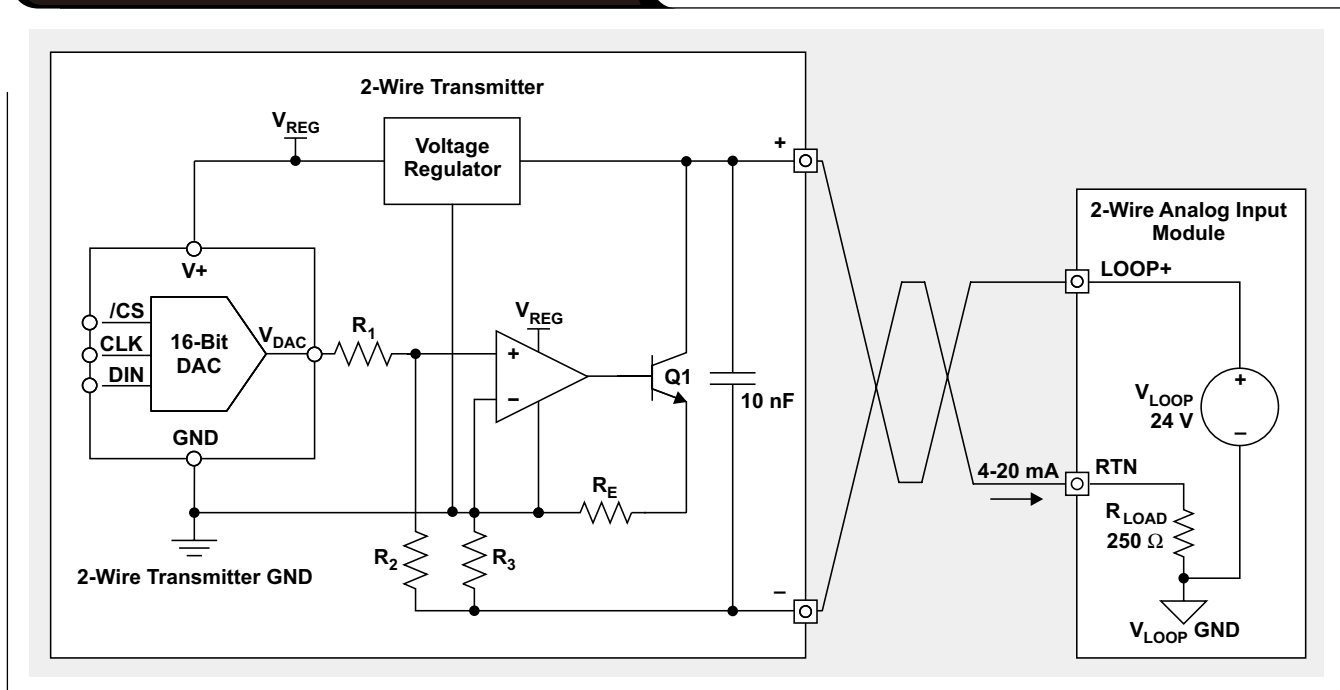
应选择合适的运放性能规格以与 DAC 及信号链路的其余部分相匹配。运放必须具备低的输入失调电压和漂移。高 CMRR 和 PSRR 将改善设计的 DC 性能和抗噪声能力。通常使用 eTrim™、激光修整和零漂移 (斩波器 / 自动归零) CMOS 运放以满足该电路的性能要求。

如 (6) 式中的转移函数所示, 电阻器 R_1 、 R_2 和 R_3 设定了电路的增益。应选择具有低容差和温度系数的高精度电阻器。实现电阻器的比例式容差及漂移匹配可极大地改善整个温度范围内的电路性能。

$$I_{OUT} = \frac{V_{DAC}}{R_1 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)} \quad (6)$$

针对负载瞬变和输出电流中的变化, 该电路必须保持稳定的输出响应。因此, 应根据 V-I 曲线负载线上的 Q 点来选择正确的发射极电阻器 (R_E), 这一点很重要。^[5] 正确选定的 R_E 阻值可形成一个稳定的反馈网络。

图 7: 由回路供电的 4 至 20 mA 发送器



三线式电压输出运放电路

图 8 示出了一款用于建立一个三线式电压输出的标准运放电路。三线式电路需要使用高电压运放以满足输出电压范围要求。单电源、0 V 至 10 V 输出需要一个包括地 (GND) 的输入共模范围和一个轨至轨输出级, 旨在减少系统中的零代码误差。^[6] 对于运放的性能要求与两线式电路相同; 例如: 低失调和漂移以及高 CMRR 和 PSRR。

增益由电阻器 R_F 和 R_G 来设定。它们的选择标准与两线式电路中的增益设定电阻器是一样的。

$$V_{OUT} = V_{IN} \times \left(1 + \frac{R_F}{R_G} \right) \quad (7)$$

在三线式电压输出电路中, 运放直接驱动系统负载, 此类负载会因最终应用的不同而千差万别。于是, 需要一个能够为各种各样的电容性负载提供超过 ± 30 mA 输出电流的稳健型运放输出级。几乎没有放大器能直接驱动大的电容性负载, 因而需要利用由 R_{ISO} 、 R_F 、 C_F 和 C_L 构成的补偿网络来提供一个稳定的输出。^[7] 为了对电路实施正确的补偿, 必须获知运放开环增益 (A_{OL}) 和开环输出阻抗 (Z_O)。此外, 还必需考虑所有系统工作条件下 A_{OL} 和 Z_O 曲线中的变化, 否则设计有可能变得不稳定。^[8, 9]

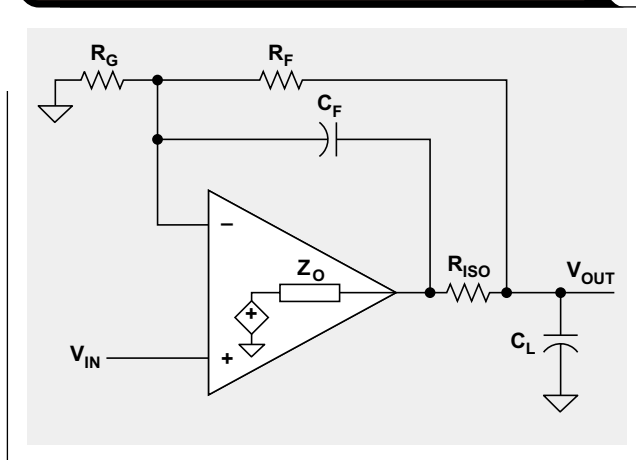
结论

工业过程控制应用中的阻性桥压力传感器具有许多设计考虑因素。对输入信号调节级、ADC 和模拟输出级的性能和规格指标均必须进行评估。本文逐个介绍了这些信号链路级的主要设计考虑因素, 并为设计人员选择设计所用的组件提供了相关的指导。

参考文献

- 1、作者: Peter Semig 和 Collin Wells, 《仪表放大器 V_{CM} 与 V_{OUT} 关系曲线图》, 第一部分、第二部分、第三部分, 摘自 EDN Network, 2014 年 12 月。
- 2、作者: Peter Semig, 《INA: 失调电压与增益的关系》, 摘自 TI 模拟精密技术杂谈博客, 2014 年。
- 3、作者: Peter Semig 和 Tim Claycomb, 《低漂移双向单电源低侧电流感测参考设计》, 摘自 TI Precision Reference Design (TIPD156)。
- 4、作者: Miroslav Oljaca 和 Tom Hendrick, 《将 ADS1202 与 FPGA 数字滤波器相组合以用于电机控制应用中的电流测量》, TI 应用报告 (SBAA094), 2003 年 6 月。

图 8: 用于电容性负载驱动的补偿电路



- 5、作者: Miro Oljaca、Tim Green 和 Collin Wells, 《将 PGA900 用作 4 至 20 mA 电流环路发送器》, TI 应用报告 (SLDA030), 2015 年 5 月。
- 6、作者: Collin Wells 和 Reza Abdullah, 《采用 DACx760 实现的组合式电压和电流输出》, TI 应用报告 (SBAA199), 2014 年 7 月。
- 7、作者: Miro Oljaca、Tim Green 和 Collin Wells, 《将 PGA900 用作电容性负载驱动器》, TI 应用报告 (SLDA020), 2015 年 3 月。
- 8、作者: Miro Oljaca、Collin Wells 和 Tim Green, 《了解 PGA900 DAC 增益放大器的开环增益》, TI 应用报告 (SLDA031), 2015 年 4 月。
- 9、作者: Miro Oljaca、Collin Wells 和 Tim Green, 《了解 PGA900 DAC 增益放大器的开环输出阻抗》, TI 应用报告 (SLDA033), 2015 年 5 月。

相关网站

产品信息:

PGA900

PGA300

INA826

订阅 AAJ:

www.ti.com.cn/subscribe-aaaj

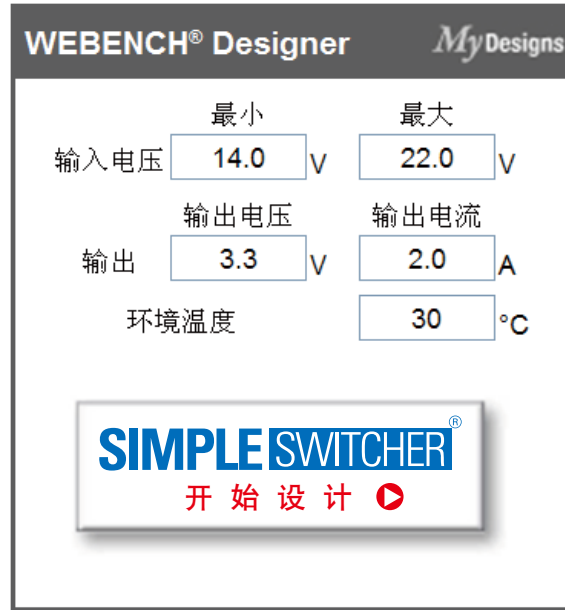
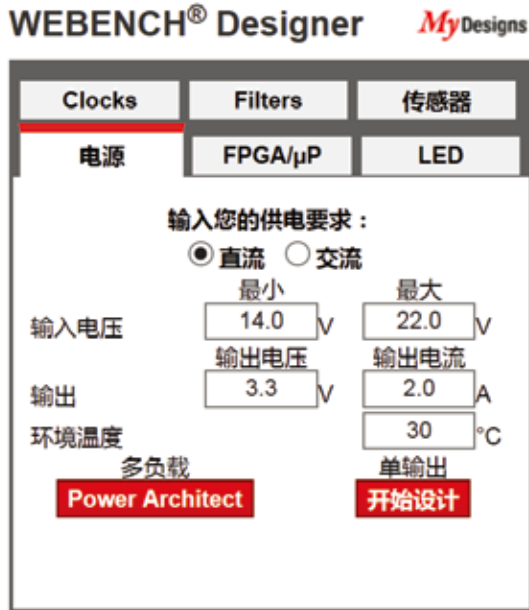
TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 ti.com.cn/tidesigns 查询最适合您的设计文档。



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。
电源在线培训课程

www.ti.com.cn/webench
www.ti.com.cn/powerlab
www.ti.com.cn/powertraining



德州仪器在线技术支持社区

www.deyisupport.com

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



weibo.com/tisemi

热门产品

DAC8760	用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC
DAC7760	单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC
ADS1247	极低噪声、精密 24 位 模数转换器
ADS1120	具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC
ISO7242	四通道 2/2 25Mbps 数字隔离器
ISO7631FM	4kV _{PK} 低功耗三通道、150Mbps 数字隔离器
TPS54062	4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器
TLK105L	工业温度、单端口 10/100Mbps 以太网物理层
SN65HVD255	CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络

了解更多, 请搜索以下产品型号:

DAC8760



重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated