

低功耗有毒气体探测器设计

作者: Luis Orozco

安全第一! 许多工业过程涉及到有毒化合物, 例如: 制造塑料、农用化学品和医药产品会用到氯气; 生产半导体需要使用磷化氢和砷化氢; 燃烧消费类包装材料会释放出氰化氢。因此, 了解有毒气体浓度是否达到危险程度十分重要。

在美国, 国家职业安全与健康研究所(NIOSH)和美国政府工业卫生学家会议(ACGIH)已规定了许多有毒工业气体的短时间和长时间接触限值。“**阈值—时间加权平均值**”(TLV-TWA)是指大多数工人可以在正常8小时工作日内反复接触而不会受到有害影响的时间加权平均浓度。“**阈值—短间接接触限值**”(TLV-STEL)是指大多数工人可以短间接接触而不会受到刺激或伤害的浓度。“**立即威胁生命或健康的浓度**”(IDLHC)是一种限制性浓度, 它会对生命立即或缓慢产生威胁, 导致不可逆转的健康损害, 或者影响工人独立逃生的能力。表1列出了几种常见气体的限值。

对于检测或测量有毒气体浓度的仪器, 电化学传感器能够提供多项优势。大多数传感器都是针对特定气体而设计, 可用分辨率小于气体浓度的百万分之一(1 PPM), 所需工作电流极小, 非常适合便携式电池供电的仪器。电化学传感器的一个重要特性是响应缓慢: 首次上电后, 传感器可能需要数分钟时间才能建立至最终输出值; 暴露于中间量程的气体浓度时, 传感器可能需要 25 到 40 秒时间才能达到最终输出值的 90%。

本文描述一种使用电化学传感器的便携式一氧化碳(CO)探测器。一氧化碳的IDLH浓度远高于大多数其它有毒气体, 处理起来相对更安全。但一氧化碳仍然属于致命性气体, 测试本文所述电路时应极其小心并采取适当的通风措施。



图 1. CO-AX 一氧化碳传感器

图 1 所示为Alphasense公司的CO-AX传感器。表 2 是CO-AX传感器技术规格摘要。

表 2. CO-AX 传感器技术规格

灵敏度	55 nA/ppm至90 nA/ppm (典型值65)
响应时间 (T_{90} from 0 ppm to 400 ppm CO)	< 30 s
范围 (保证性能)	0 ppm至2,000 ppm
气体过量限值	4,000 ppm

对于这种应用中的便携式仪表, 实现最长的电池寿命是最重要的目标, 因此, 必须将功耗降到最低, 这一点至关重要。在典型的低功耗系统中, 测量电路上电后执行一次测量, 然后关断进入长时间待机状态。然而, 在这种应用中, 由于电化学传感器的时间常数很长, 测量电路必须始终保持上电状态。幸运的是, 因为响应缓慢, 所以我们可以使用低功耗放大器、高值电阻和低频滤波器, 从而将约翰逊噪声和 $1/f$ 噪声降至最低。此外, 单电源供电可避免双极性电源的功率浪费现象。

图 2 给出了该便携式气体探测器的电路。双通道低功耗放大器ADA4505-2在恒电位配置(U2-A)和跨导配置(U2-B)下使用。该放大器的功耗和输入偏置电流非常低, 对于恒电位部分和跨导部分都是很好的选择。每个放大器的功耗仅 $10 \mu\text{A}$, 因此电池寿命非常长。

表 1. 某些常见工业有毒气体的接触限值

有毒气体	长时间接触限值 (TLV-TWA) (ppm)	短间接接触限值 (TLV-STEL) (ppm)	立即威胁生命或健康的浓度 (IDLHC) (ppm)
一氧化碳	50	200	1,200
二氧化碳	5,000	30,000	40,000
氯气	0.5	1	10
磷化氢	0.3	1	50
硫化氢	10	20	100

在三电极电化学传感器中，目标气体扩散到传感器，通过一层薄膜后作用于工作电极(WE)。恒电位电路检测参考电极(RE)的电压，并向辅助电极(CE)提供电流，使 RE 端与 WE 端之间的电压保持恒定。RE 端没有电流流进或流出，因此流出 CE 端的电流流进 WE 端，该电流与目标气体浓度成正比。流过 WE 端的电流可能是正值，也可能是负值，具体取决于传感器中发生的是还原反应还是氧化反应。对于一氧化碳，发生氧化时，CE 端电流为负值(电流流入恒电位运算放大器的输出端)。电阻 R4 通常非常小，因此 WE 端的电压约等于 V_{REF} 。

流入 WE 端的电流会导致 U2-A 的输出端产生相对于 WE 端的负电压。对于一氧化碳传感器，此电压通常为数百毫伏，但对于其它类型的传感器，此电压可能高达 1 V。为采用单电源供电，低功耗基准电压源 ADR291 (U1) 将整个电路提升到地以上 2.5 V。ADR291 的功耗仅 12 μ A；它还能提供基准电压，以使模数转换器可对此电路的输出进行数字化处理。

跨导放大器的输出电压为：

$$V_O = 2.5 \text{ V} + I_{WE} \times R_f \quad (1)$$

其中：

I_{WE} 为流入 WE 端的电流。

R_f 为跨导电阻 (在图 2 中显示为 U4)。

传感器的最大响应为 90 nA/ppm，如表 2 所示，其最大输入范围为 2,000 ppm。因此，最大输出电流为 180 μ A，最大输出电压由跨导电阻决定，如公式 2 所示。

$$V_O = 2.5 \text{ V} + 2,000 \text{ ppm} \times 90 \text{ nA/ppm} \times R_f = 2.5 \text{ V} + 180 \mu\text{A} \times R_f \quad (2)$$

针对不同气体或来自不同制造商的传感器具有不同的电流输出范围。如果 U4 使用可编程变阻器 AD5271，而不是固定电阻，就可以针对不同的气体传感器采用相同的结构和材料。此外，这样的产品还支持调换传感器，因为微控制器可以针对不同的气体传感器，将 AD5271 设置为适当的电阻值。AD5271 的温度系数为 5 ppm/ $^{\circ}$ C，优于大多数分立电阻；其电源电流为 1 μ A，对系统功耗的影响极小。

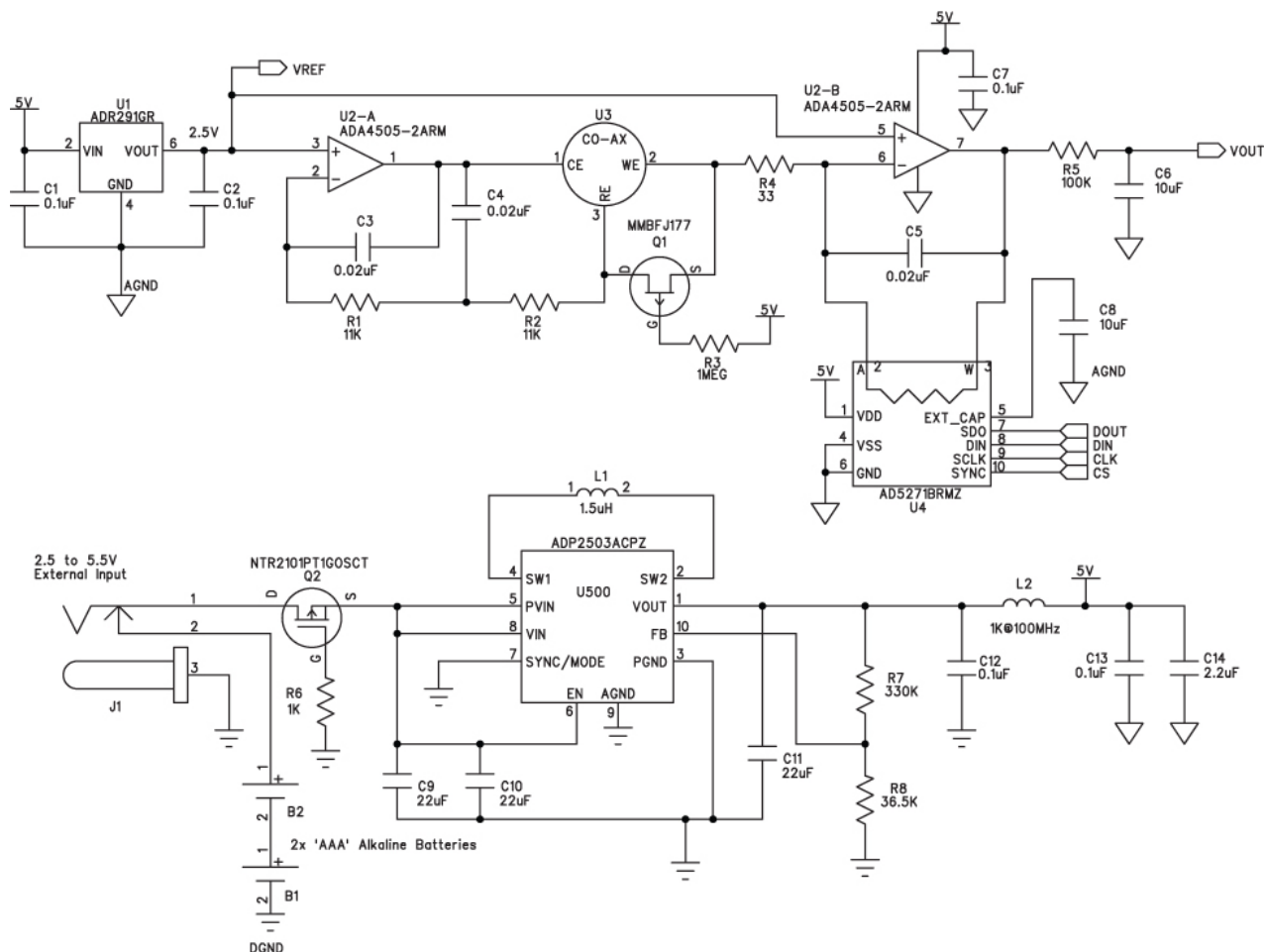


图 2. 使用电化学传感器的便携式气体探测器

采用 5 V 单电源供电时，根据公式 1 可知，跨导放大器 U2-B 的输出范围为 2.5 V。如果将 AD5271 设置为 12.5 kΩ，就可以利用传感器最差灵敏度情况下的范围，并能提供大约 10% 的超量程能力。

使用 65 nA/ppm 的典型传感器响应，可以通过下式将输出电压转换为二氧化碳的 ppm：

$$V_O = 2.5 \text{ V} + 813 \text{ } \mu\text{A/ppm} \quad (3)$$

采用差分输入 ADC 时，只需将 2.5 V 基准电压输出端连接到 ADC 的 A_{IN} 端，从而消除公式 3 中的 2.5 V 项。

电阻 R4 使跨导放大器的噪声增益保持在合理水平。R4 的值需权衡两个因素：噪声增益的幅度和暴露于高浓度气体时传感器的建立时间误差。对于本电路，R4 = 33 Ω，由此可计算噪声增益等于 380，如公式 4 所示。

$$NG = 1 + \frac{12.5 \text{ k}\Omega}{33 \text{ }\Omega} = 380 \quad (4)$$

跨导放大器的输入噪声应乘以此增益。ADA4505-2 的 0.1 Hz 至 10 Hz 输入电压噪声为 2.95 μV p-p，因此输出端的噪声为：

$$V_{\text{output_noise}} = 2.95 \text{ } \mu\text{V} \times NG = 1.1 \text{ mV p-p} \quad (5)$$

该输出噪声相当于 1.3 ppm p-p 以上的气体浓度，这种低频噪声难以滤除。幸好传感器响应非常慢，因此由 R5 和 C6 构成的低通滤波器可以具有 0.16 Hz 的截止频率。此滤波器的时间常数为 1 秒，与传感器的 30 秒响应时间相比可忽略不计。

Q1 为 P 沟道 JFET。电路启动时，栅极电压为 V_{CC}，晶体管断开。系统关断时，栅极电压降至 0 V，JFET 开启，使 RE 端和

WE 端保持相同的电位。当电路再次启动时，这可以大大改善传感器的开启建立时间。

该电路由两节 AAA 电池供电。使用二极管提供反向电压保护会浪费宝贵的电能，因此本电路使用 P 沟道 MOSFET (Q2)。该 MOSFET 通过阻塞反向电压来保护电路，施加正电压时导通。MOSFET 的导通电阻小于 100 mΩ，因此它引起的压降远小于二极管。除 AAA 电池以外，降压-升压调节器 ADP2503 还允许使用最高 5.5 V 的外部电源。在省电模式下工作时，ADP2503 的功耗仅 38 μA。由 L2、C12 和 C13 构成的滤波器可消除模拟电源轨产生的任何开关噪声。连接外部电源时，该仪表不是通过一个电路来断开电池，而是利用一个插孔以机械方式断开电池，从而避免电能浪费。

使用 AAA 电池时，正常情况（未检测到气体）下的总功耗约为 100 μA，最差情况（检测到 2,000 ppm CO）下的总功耗约为 428 μA。如果该仪表与一个微控制器相连，在不进行测量时可进入低功耗待机模式，则电池寿命可达 1 年以上。

参考文献

NIOSH 化学危害袖珍指南
<http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

Alphasense CO-AX 数据手册
<http://www.alphasense.com/pdf/COAX.pdf>

作者简介

Luis Orozco [luis.orozco@analog.com] 是 ADI 公司工业和仪器仪表部系统应用工程师，主要涉足精密仪器仪表、化学分析和环境监测应用。他于 2011 年 2 月加入 ADI 公司。

