

解决电化学气体检测的技术挑战

Michal Raninec, 系统应用工程师

电化学气体传感器是一种久经验证的技术，其历史可以追溯到1950年代，当时开发了用于氧气监测的电化学传感器。这种技术的首批应用之一是葡萄糖生物传感器，用于测量葡萄糖的缺氧情况。在接下来的几十年中，该技术得到了发展，传感器变得小型化并能检测多种目标气体。

随着传感技术无处不在的时代到来，许多行业出现了无数新的气体检测应用，例如汽车空气质量监测或电子鼻。不断发展的法规和安全标准对新应用和现有应用提出了比过去更具挑战性的要求。换句话说，未来的气体检测系统必须能精确测量低得多的浓度，对目标气体更具选择性，依靠电池电源工作更长的时间，并在更长的时间内提供稳定一致的性能，同时始终保持安全可靠的运行。

电化学气体传感器的优缺点

电化学气体传感器的普及可以归因于其线性输出、低功耗要求和良好的分辨率。此外，一旦根据目标气体的已知浓度进行校准，其测量的重复性和精度也非常好。数十年来技术的发展，让这些传感器可以对特定气体类型提供非常好的选择性。

由于其优点众多，工业应用（例如用于保护工人安全的有毒气体检测）率先采用了电化学传感器。这些传感器的运行经济性促进了区域有毒气体监测系统的部署，确保了采矿、化学工业、沼气厂、食品生产、制药工业等行业员工的安全环境条件。

尽管检测技术本身在不断进步，但自电化学气体检测出现以来，其基本工作原理以及与生俱来的缺点并未改变。通常，电化学传感器的保质期有限，一般为六个月至一年。传感器的老化也会对其长期性能产生重大影响。传感器制造商通常会指定传感器灵敏度每年最多可漂移20%。此外，虽然目标气体选择性已有显著改善，但传感器仍存在对其他气体的交叉敏感性问题，导致测量受到干扰和读数出错的几率增加。传感器性能还与温度相关，必须在内部进行温度补偿。

技术挑战

设计先进气体检测系统需要克服的技术挑战可以分为三类，分别对应于系统生命周期的不同阶段。

首先是传感器制造挑战，例如制造可重复性以及传感器的表征和校准。制造过程本身虽然已高度自动化，但不可避免地会给每个传感器带来差异。由于这些差异，传感器必须在生产过程进行表征和校准。

其次，在系统的整个生命周期中都存在技术挑战。这包括系统架构优化，例如信号链设计或功耗考虑。另外，工业应用中特别注重电磁兼容性(EMC)和功能安全合规性，这会对设计成本和上市时间产生负面影响。工作条件也起着重要作用，并对保持所需性能和使用寿命提出了挑战。电化学传感器在其使用寿命期间会老化和漂移（这是这种技术的本性），导致需要频繁校准或更换传感器。如果在恶劣环境中运行，性能的变化会进一步加速，如本文后面所述。在延长传感器使用寿命的同时保持其性能，是许多应用的关键要求之一，尤其是在系统拥有成本至关重要的情况下。

第三，即使采用了延长使用寿命的技术，所有电化学传感器最终都会达到其生命终点，此时性能不再满足要求，需要更换传感器。有效检测寿命结束条件是一个挑战，若能解决这个挑战，便可减少不必要的传感器更换，从而大幅降低成本。更进一步，若能准确预测传感器何时将失效，气体检测系统的运行成本将会降低更多。

在全部气体检测应用中，电化学气体传感器的利用率都在增加，这给此类系统的物流、调试和维护带来了挑战，导致总拥有成本增加。因此，人们采用具有诊断功能的专用模拟前端来减少技术缺点（主要是传感器寿命有限）带来的影响，确保气体检测系统长期可持续且可靠。

信号链集成降低设计复杂性

传统信号链大多采用独立的模数转换器、放大器和其他构建模块设计，相当复杂，迫使设计人员在功效比、测量精度或信号链占用的PCB面积上做出折衷。

这种设计挑战的一个例子是具有多气体配置、可测量多种目标气体的仪器。每个传感器可能需要不同的偏置电压才能正常运行。此外，每个传感器的灵敏度可能不同，因此必须调整放大器的增益以使信号链性能最大化。对设计人员而言，仅这两个因素就增加了可配置测量通道（其应与不同传感器接口而无需更改 BOM 或原理图）的设计复杂度。单个测量通道的简化框图如图1所示。

就像任何其他电子系统一样，集成是演进中的一个逻辑步骤，通过集成可设计出更高效、更强大的解决方案。集成的单芯片气体检测信号链通过集成TIA（互阻放大器）增益电阻或将数模转换器用作传感器偏置电压源等措施来简化系统设计（如图2所示）。由于信号链集成，测量通道可以通过软件来全面配置，以与众多不同类型的电化学传感器接口，同时降低设计的复杂性。此外，这种集成信号链的功率要求也明显降低，这对于以电池寿命为关键考虑因素的应用至关重要。最后，由于降低了

信号链的噪声水平，并且有可能利用性能更好的信号处理器件（如TIA或ADC），因此测量精度得以提高。

回顾多气体仪器的例子，信号链集成使其能够：

- ▶ 实现完全可配置的测量通道，同时降低信号链的复杂性，从而轻松重用单个信号链设计
- ▶ 减少信号链占用的PCB面积
- ▶ 降低功耗
- ▶ 提高测量精度

传感器劣化与诊断

尽管信号链集成是向前迈出的重要一步，但它本身并未解决电化学气体传感器的根本缺点，即其性能会随着使用时间推移而下降。不难理解，这是传感器的工作原理和结构所导致的。工作条件也会致使性能下降并加速传感器老化。传感器精度会降低，直到变得不可靠，不再适合完成其任务。在这种情况下，通常的做法是让仪器下线并手动检查传感器，这既耗时又昂贵。然后，根据其状况，可以重新校准传感器并再次使用，或者可能需要予以更换。这会招致相当大的维护成本。通过利用电化学诊断技术，可以分析传感器的健康状况并有效补偿性能变化。

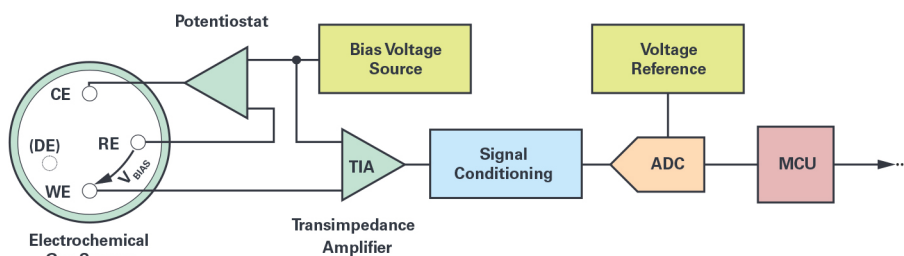


图1 典型电化学气体传感器信号链（简图）

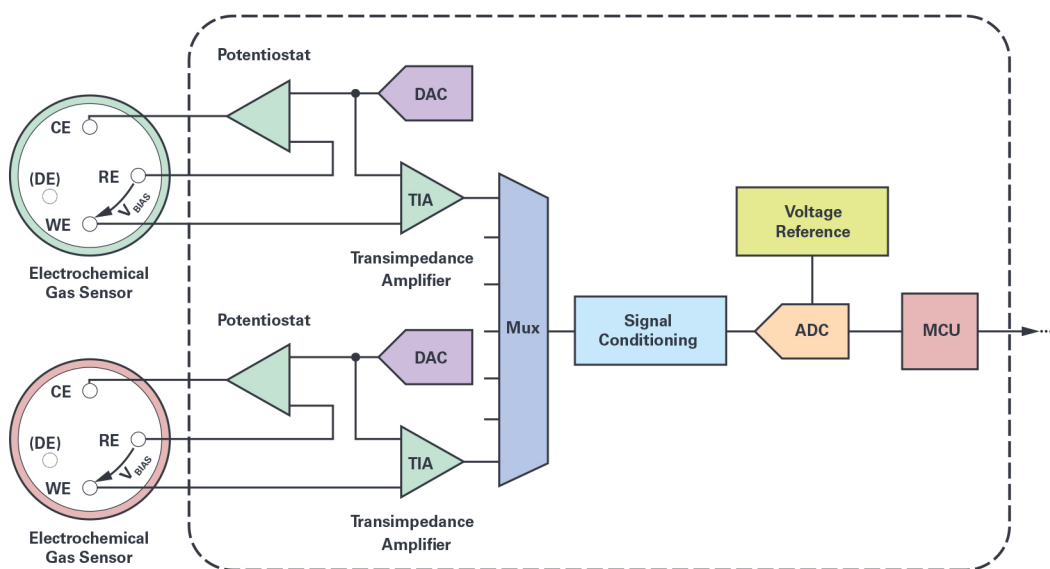


图2 双通道集成气体检测信号链（简图）

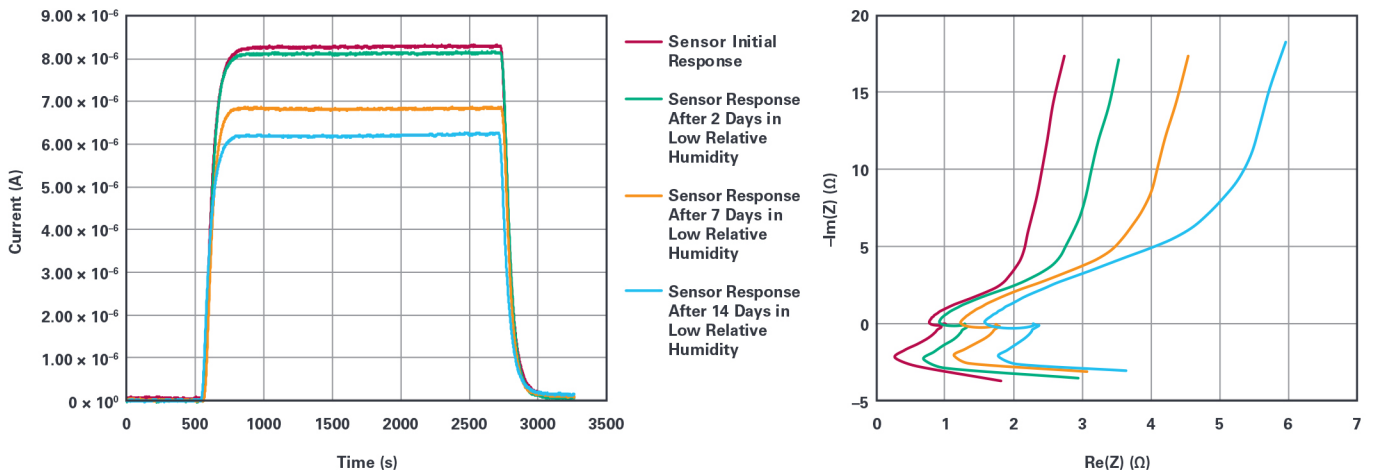


图3. 在低相对湿度下的加速寿命测试中，传感器灵敏度（左图）和阻抗（右图）之间的相关性。

导致性能下降的常见因素包括温度、湿度和气体浓度过高或电极中毒。短时间暴露于较高温度（50°C以上）一般是可以接受的。但是，让传感器反复经受高温会导致电解质蒸发，并对传感器造成不可逆转的损坏，例如引起基线读数偏移或响应时间变慢。另一方面，超低温度（-30°C以下）会大大降低传感器的灵敏度和响应能力。

湿度是对传感器寿命影响最大的因素。电化学气体传感器的理想工作条件是20°C和60%相对湿度。环境湿度低于60%会导致传感器内部的电解质变干，从而影响响应时间。另一方面，湿度高于60%会导致空气中的水被传感器吸收，从而稀释电解质并影响传感器的特性。吸收水分还会导致传感器泄漏，可能致使引脚腐蚀。

上述劣化机制的幅度即使不是非常大，也会影响传感器。换句话说，电解质耗尽之类的事情是自然发生的，会导致传感器老化。无论工作条件如何，老化过程都会限制传感器的寿命，不过某些EC Sense气体传感器的工作时间可超过10年。

可以使用电化学阻抗谱(EIS)或计时安培分析法（在观测传感器输出的同时施加偏置电压脉冲）等技术来分析传感器。

EIS是利用正弦信号（通常为电压）激励电化学系统而进行的频域分析测量。在每个频率下，流过电化学电池的电流都会被记录下来，用于计算电池的阻抗。然后，数据通常以奈奎斯特图和波特图形式显示。奈奎斯特图显示复阻抗数据，每个频率点均由x轴上的实数部分和y轴上的虚数部分来绘制。这种数据表示的主要缺点是会丢失频率信息。波特图显示阻抗幅度和相位角与频率的关系。

实验测量结果表明，传感器灵敏度的下降与EIS测试结果的变化之间具有很强的相关性。图3中的示例显示了加速寿命测试的结果，其中电化学气体传感器被置于低湿度(10%RH)和较高温度(40°C)的环境中。在整个实验过程中，定时将传感器从环境室中取出并放置一个小时，然后进行已知目标气体浓度下的基线灵敏

度测试和EIS测试。测试结果清楚表明了传感器灵敏度和阻抗之间的相关性。这种测量的缺点是颇费时间，因为在很低的亚赫兹频率下获得测量结果非常耗时。

计时安培法（脉冲测试）是另一种有助于分析传感器健康状况的技术。测量方法如下：在传感器偏置电压上叠加一个电压脉冲，同时观测流经电化学电池的电流。脉冲幅度一般非常低（例如1 mV）且很短（例如200 ms），因此不会干扰传感器本身。这样便能相当频繁地执行测试，同时气体检测仪器保持正常运行。在执行更耗时的EIS测量之前，可以使用计时安培法来检查传感器是否已物理插入设备中，还能指示传感器性能的变化。传感器对电压脉冲响应的示例如图4所示。

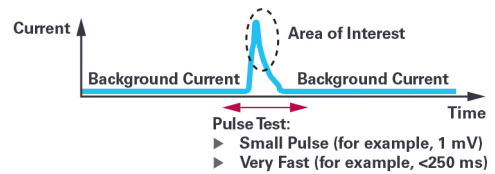


图4. 计时安培分析法测试的示例结果

先前的传感器探查技术已在电化学领域使用了数十年。然而，这些测量所需的设备通常很昂贵且笨重。从实践和资金两方面看，使用这种设备根本无法测试现场部署的大量气体传感器。为了实现远程内置传感器健康状况分析，必须将诊断特性直接集成为信号链的一部分。

借助集成的诊断功能，可以在无需人工干预的情况下自动测试气体传感器。如果在生产中对气体传感器进行了表征，则从传感器获得的数据可以与这些特征数据集进行比较，从而深入了解传感器的当前状况，然后使用智能算法来补偿传感器灵敏度的损失。此外，传感器的历史记录可以支持预测其寿命何时结束，并在需要更换传感器时提醒用户。内置诊断功能最终会减少气体检测系统的维护需求，延长传感器的使用寿命。

工业应用的系统设计挑战

安全性和可靠性至关重要，特别是在工业环境中。在严苛的工业环境（例如化工厂）中运行时，有严格的规章来确保气体检测系统满足这些要求并保持可靠、完整的功能。

电磁兼容性(EMC)是指不同电子设备在共同的电磁环境中正常运行而互不干扰的能力。EMC涉及的测试有电磁辐射发射或辐射抗扰度等。辐射发射测试研究系统的有害辐射以帮助减少辐射，而辐射抗扰度测试会检查系统在受到其他系统干扰的情况下保持其功能的能力。

EC气体传感器本身的结构对EMC性能有负面影响。传感器电极起到天线一样的作用，可以拾取附近电子系统的干扰。对于无线连接的气体检测设备（例如便携式工人安全仪器），这种影响更为明显。

EMC测试通常是一个非常耗时的过程，在最终满足要求之前可能需要多次迭代系统设计。此测试对投入产品开发的成本和时间有很大影响。使用经过预先测试的满足EMC要求的集成信号链解决方案，可以减少时间和成本支出。

功能安全是另一个要认真考虑的方面，同时也是一项技术挑战。根据定义，功能安全是指检测到潜在的危险状况时，会激活保护或纠正机制以防止任何危险事件发生。这种安全功能提供的风险降低的相对程度被定义为安全完整性等级(SIL)。功能安全要求当然已包含在工业标准中。

在工业气体检测应用中，功能安全的重要性主要涉及安全操作环境，因为环境中可能存在爆炸性或易燃性气体。化工厂或采矿设施就是此类应用的很好例子。为了符合功能安全标准，系统必须通过功能安全认证，达到满意的安全完整性等级。

ADI公司的单芯片电化学测量系统

为解决上述挑战，并让客户设计出更智能、更精确、更具竞争力的气体检测系统，ADI公司推出了ADuCM355——一种针对气体检测和水分析应用的单芯片电化学测量系统。

ADuCM355集成了两个电化学测量通道，一个用于传感器诊断的阻抗测量引擎，以及一个用于运行用户应用程序和传感器诊断补偿算法的超低功耗混合信号ARM® Cortex®-M3微控制器。图5显示了ADuCM355的简化功能框图。

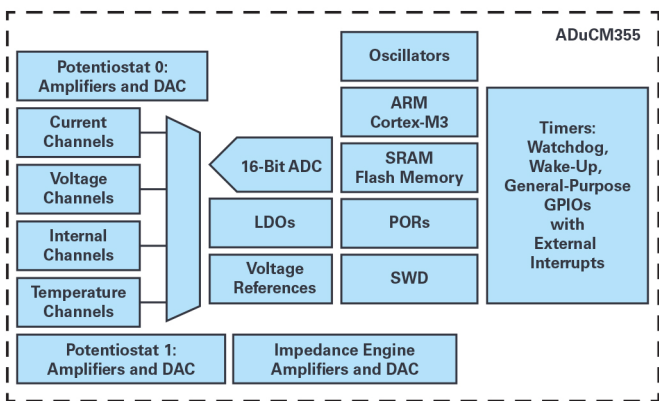


图5. ADuCM355的简化功能框图

对市场趋势和客户需求的了解，帮助ADI公司设计出高度集成的片内测量系统，其中包括：

- ▶ 一个16位400 kSPS ADC
- ▶ 两个双输出DAC，用于产生电化学电池的偏置电压
- ▶ 两个带TIA放大器的超低功耗、低噪声恒电位仪
- ▶ 一个具有高速TIA的高速12位DAC
- ▶ 支持诊断测量的模拟硬件加速器（波形发生器、数字傅立叶变换模块和数字滤波器）
- ▶ 内部温度传感器
- ▶ 26 MHz ARM Cortex-M3微控制器

ADuCM355提供了克服电化学气体检测技术挑战的手段。两个测量通道不仅支持最常见的3电极气体传感器，还支持4电极传感器配置。第四个电极既可用于诊断目的，也可以在双重气体传感器中用作第二目标气体的工作电极。任一恒电位仪也可以配置为休眠模式以降低功耗，同时保持传感器偏置电压，从而减少传感器在正常运行之前可能需要的稳定时间。模拟硬件加速器模块支持传感器诊断测量，例如电化学阻抗谱和计时安培分析法。集成的微控制器可用于运行补偿算法、存储校准参数以及运行用户应用程序。ADuCM355在设计时还考虑了EMC要求，并经过预先测试，符合EN 50270标准。

如果应用不需要集成微控制器，可以使用仅有前端的版本——AD5940。

结论

得益于技术创新，我们现在拥有所有必要的知识和工具，可以有效应对电化学气体传感器的技术挑战，扫清我们进入普遍检测时代的障碍。从低成本的无线空气质量监测器到过程控制和工人安全应用，信号链集成和内置诊断特性将使这些传感器得到广泛使用，同时减少维护需求，提高精度，延长传感器寿命，并降低成本。

作者简介

Michal Raninec是ADI公司自动化与能源业务部工业系统部门的系统应用工程师。其专业领域包括电化学气体检测和无线传感器网络。Michal毕业于捷克布尔诺科技大学，获得电子工程硕士学位。联系方式：michal.raninec@analog.com。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，[中文技术论坛](#)
与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn



世健系统(香港)有限公司
世健国际贸易(上海)有限公司

www.excelpoint.com.cn
info@excelpoint.com.hk

香港 +852 2503 2212	上海 +86 21 2220 3188	北京 +86 10 6580 2113	长沙 +86 731 8220 4725
成都 +86 28 8652 7611	福州 +86 591 8335 7003	广州 +86 20 3893 9561	杭州 +86 571 8528 2185
济南 +86 531 8096 5769	南京 +86 25 8689 3130	宁波 +86 574 8386 5759	青岛 +86 532 8502 6539
深圳 +86 755 8364 0166	苏州 +86 512 6530 8103	武汉 +86 27 8769 0883	厦门 +86 592 504 2386
西安 +86 29 8765 1058	重庆 +86 136 2830 7074	大连 +86 156 4083 6155	东莞 +86 158 8963 8656
合肥 +86 139 2377 2952	惠州 +86 136 8076 4680	沈阳 +86 156 0405 4122	天津 +86 139 2065 6573
无锡 +86 185 5103 2234	烟台 +86 155 5222 0532	郑州 +86 138 0384 6359	珠海 +86 137 2622 4480