

我的电压参考源设计是否对湿度敏感? 控制精密模拟系统湿度和性能的方法

作者: Paul Perrault和Robert Kiely

简介

电压参考在精密模拟系统中起着至关重要的作用, 通常用于设定模数转换器(ADC)中噪声/分辨率的下限值, 适用于仪器仪表、测试和测量以及能量计量等应用中的精密测量系统。对于设计工程师来说, 供应商提供的产品组合可能包含众多芯片可供选择, 令人眼花缭乱。但是, 使用各种电压参考规格(电压噪声、精度、漂移、静态电流、串联和分流等)及其封装选项(密封陶瓷、塑料、裸片封装), 可以评估最终的电子产品能否达到预期的出色性能, 这一点非常值得。设计中存在很多误区, 它们可能悄无声息地让您无法达成想要达到的 μV 或 nV 噪声精度目标。本文从整个PCB制造过程的角度出发, 探讨设计工程师或PCB组装工程师如何在保证系统模拟性能的同时, 使系统不受外界环境影响。

背景知识

虽然每个电子设计在性能方面都会做出不同程度的妥协, 但一般的模拟信号链都会以某种形式进行模拟输入信号调理, 比如ADC和电压参考。为了辅助阐述本文的主旨, 我们将以一个中速100 kSPS、16位的模拟传感器信号输入设计为例, 具体如图1所示。如需了解有关该信号链的一些设计权衡和设计选择的更多信息, 请参阅CN-0255电路笔记。

本应用中使用的2.5 V电压参考是ADR45xx塑料封装电压参考系列中的ADR4525, 可以提供高精度、低功耗、低噪声, 且具有 $\pm 0.01\%$ ($\pm 100\text{ppm}$)初始精度、出色的温度稳定性和低输出噪声。ADR4525的低热致输出电压迟滞和低长期输出电压漂移提高了系统性能。950 μA 的最大工作电流和500 mV的低压差(最大值)使该器件非常适合便携式设备。

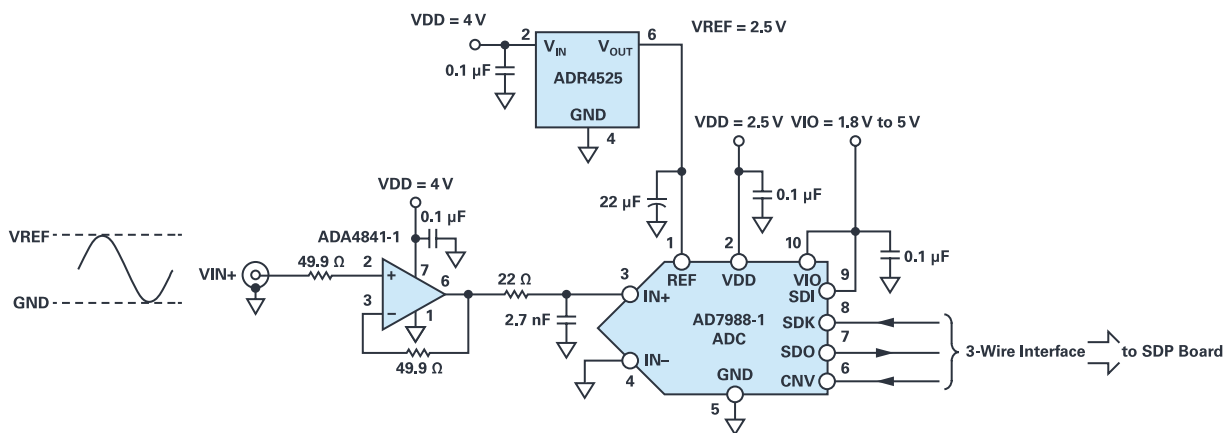


图1. 16位信号链功能框图。

在您选定了精密模拟信号链要使用的元件之后，就该由PCB组装团队来生产可重复生产的系统，他们使用印刷电路板作为电子设计的基板。任何从事过精密电子工作的人都知道，板级机械应力在精密电路设计或基于MEMS的传感器设计中会以直流偏置的形式表现出来。验证方法很简单，您只需要按压电压参考的塑料封装，就可以看到输出电压或传感器输出的变化。由于水分/湿度/温度会造成差异应力，所以水分和温度等环境因素会影响电子器件性能。由于制作封装和电路板的材料的热膨胀系数不同，温度会使封装和电路板产生机械应力。由于塑料和电路板都会吸收水分并膨胀，水分会使封装和电路板产生机械应力。在塑料封装电压参考中，因为环境原因产生的机械应力往往表现为随温度/时间变化产生漂移，在塑料封装MEMS加速度计中，则表现为增加偏移量。对于塑料封装，湿度导致的机械应力相当显著，要控制这种湿度效应，方法之一就是集成电路封装到陶瓷或密封封装中。虽然此方法能解决大量与湿度有关的挑战，但这种解决方案会额外增加封装成本，且通常会导致元件尺寸更大。

保形涂层选项

另一种将这些应力从参考电压中分离出来的方法是在PCB制造过程中使用保形涂层，这样电路板上的任何机械应力都会对参考电压造成更小的影响。在这种情况下，在电压参考和相应的PCB上涂上一层薄薄的复合涂层，可以确保PCB上因为水分或温度导致的应力不会完全转化为参考电压芯片封装上的差异应力，并且产生漂移。这也可以确保减小低温凝结湿气对封装的影响。

HumiSeal®是一家专业涂料制造商，提供多种保形涂层，包括丙烯酸树脂、聚氨酯、硅树脂、环氧树脂，以及用于保护PCB生产中的敏感器件的水性涂料。水蒸汽渗透性(MVP)参数可以确定选择的涂层是否合适，这个参数是水蒸汽通过涂层的速率。因为我们正在努力使PCB不受湿度的影响，所以这一点相当重要。

测试MVP的方法：取干杯子涂上相应的涂层，将它们置于不同湿度的恒温室中，然后定期称量杯子的重量，以评估有多少水分通过涂层进入干杯子。为期一周的测试表明，这些涂层能够有效减缓水分通过的速度。

表1所示为选择各种保形涂层时，它们各自的MVP标称值和材料厚度。

表1. 各种HumiSeal涂层和它们的MVP

材料	蒸汽渗透 (g/m ² /天)	标准蒸汽渗透 (g/m ² /天/mil)	厚度 (mil)
HumiSeal 1A33	9.18	0.315	29.13
HumiSeal 2A64	13.54	0.249	54.33
HumiSeal 1A20	21.89	0.492	44.49
HumiSeal UV40	0.83	0.024	35
HumiSeal UV40	由于不透水，测试一周后无数据	由于不透水，测试一周后无数据	61.41
HumiSeal UV40-250	9.1	0.156	58.26
HumiSeal 1B73	25.1	1.2	20.86
HumiSeal 1C49LV	60.14	2.22	27
HumiSeal 1B51	0.78	0.026	35

查看表中的数据可以发现，在所有情况下（除了UV40这种非常厚的紫外线固化涂层材料以外），随着时间流逝，这些涂层都会出现一定程度的水分渗透。这是根据给定时间段内给定表面区域的涂层的渗水重量测量得出的数据；在这些测量中，时间周期为七天。选择常用的1A33涂层（一种使用方便、经济高效的聚氨酯涂层）结果显示，与相同厚度的橡胶基1B51涂层相比，该涂层减缓水蒸汽吸收速度的效果高出10倍以上。但是，从这个表中得出的重要结论是，在高湿度环境下放置足够长的时间后，这些涂层无法完全隔离水分渗透。

这并不是否定了保形涂层的使用。相反，这可以帮助了解电子设备所处的环境。裸露在外的电子设备只会经历短时间高水蒸汽渗透吗？电子设备的包装/容器是否会阻挡水蒸汽渗透？采用保形涂层和即系腰带又穿背带一样有用？电子器件所处的环境变化如此频繁，采用保形涂层是否只是为了让电子器件再过快的环境变化性能更优？对于产品所有者而言，在开始采用保形涂层之前，了解所有这些问题非常重要。

在讨论实际数据之前，需要考虑的一个问题是，在某些情况下使用保形涂层会增加机械应力。这是因为如果应用不当，涂层会增大封装应力。例如，在PCB制造阶段，如果电压参考封装的表面在涂层之前就含有水分，那么几乎可以肯定，这些水分会渗透到亲水性塑料封装中。从1A33产品的数据手册可以看出：“基材本身的清洁度对于能否成功应用保形涂层至关重要。基材表面必须没有水分、污垢、蜡、油脂、助焊剂残留物和其他所有其他污染物。涂层下的污染物会导致问题，可能导致组装失败。”对于任何想要采用保形涂层的人来说，这点必须注意。

数据与讨论：它是否对湿度敏感？

为了评估保形涂层的效果，ADI公司制作了一套测试板。每个测试板都具备27个相同的高性能电压参考，采用推荐的J-STD-020回流方式焊接到PCB上。将这些电路板放置到湿度箱中，然后使用Keysight 3458A 8.5位数字万用表（002型号）进行测量，使用LTZ1000验证其达到4 ppm/年漂移量。湿度箱保持恒定温度和湿度，以便电路板保持稳定。电路板会在湿度箱中放置一周，之后，保持温度不变，增加湿度。我们在塑料封装电压参考上采用两种不同的保形涂层工艺，以评估湿度对涂层的影响。

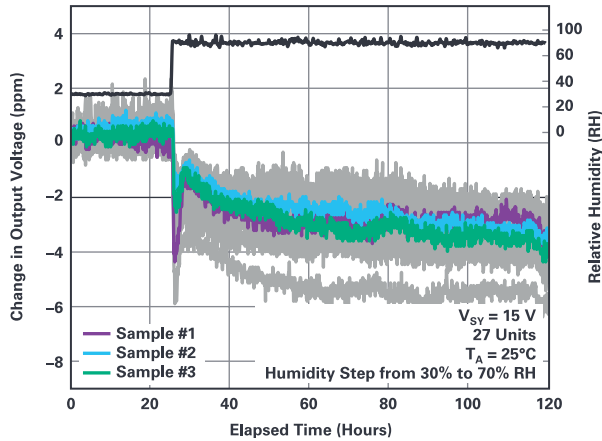


图2. ADR4525陶瓷封装中的电压参考。

以采用陶瓷封装的ADR4525为参考基准（图2），在70%湿度环境下放置100小时，结果显示，输出电压的变化约为3 ppm，或0.075 ppm/% RH，这表示陶瓷封装具有出色的稳定性。数据首次达到峰值，是因为湿度突然变化导致温度跃升。从数据中可以看出，湿度室的温度缓慢回升至25°C。相反，将采用塑料封装的电压参考芯片放置到相同的环境和测试条件下时，其电压输出变化为约150 ppm，具体如图3所示。将图3中的数据按60% RH漂移进行规格化处理，结果显示，在未采用保形涂层的情况下，输出漂移约2.5 ppm/% RH。此外，很明显可以看出，将电路板放置在高湿度环境中168小时之后，漂移并未完全停止。

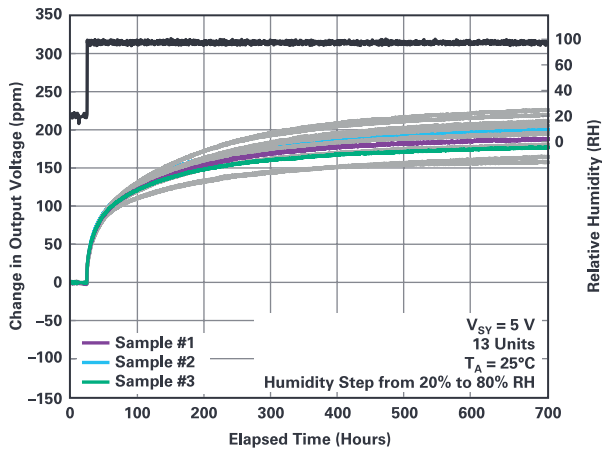


图3. 塑料封装中的ADR4525参考电压受20%到80%的湿度影响。

接下来测试了HumiSeal 1B73丙烯酸涂层，数据如图4所示。应用步骤如下：先洗净和烘干电路板（将电路板快速浸入75%异丙醇和25%去离子水中几次，用手轻刷，然后150°F烘烤2小时），然后喷涂指定厚度的1B73涂层。除边缘连接器外，整个电路板都被涂层覆盖，且电路板必须干净，才能测量输出电压。

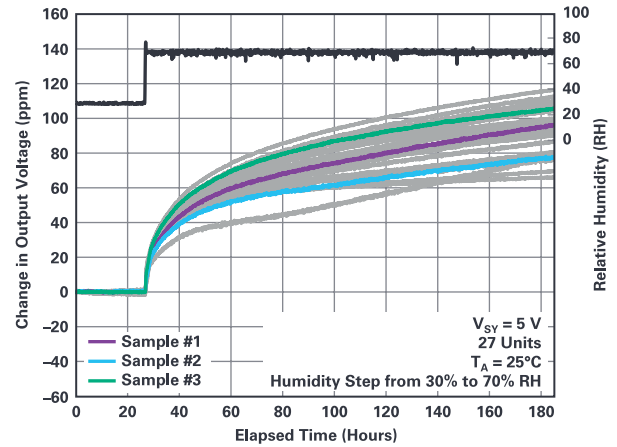


图4. 采用喷涂方式，在ADR45xx参考电压表面涂覆HumiSeal 1B73丙烯酸涂层。

本实验中使用的烘烤箱的湿度应力被限定在70% RH，规格化漂移大约为100 ppm/40% RH左右或2.5 ppm/% RH，与没有使用涂层时并无太大差别。咨询HumiSeal之后得知，可能涂层未能与电压参考封装底面以及器件边缘完全融合。这里还需要注意的是，在高湿度环境下168小时的测试时间可能还不够长，因为电压参考看起来还没有完全稳定下来，与未涂层器件类似。但是，值得注意的是，湿度影响的变化速度似乎已经减缓，至少在起始时是这样，这为水分渗透率概念提供了依据，即涂层并没有阻止水分，而是减慢了水分渗透的速度。

下一个测试尝试采用相同的保形涂层(HumiSeal 1B73)，但采用深浸式三步涂覆工艺，以确保涂层完全覆盖整个电路板。数据如图5所示。

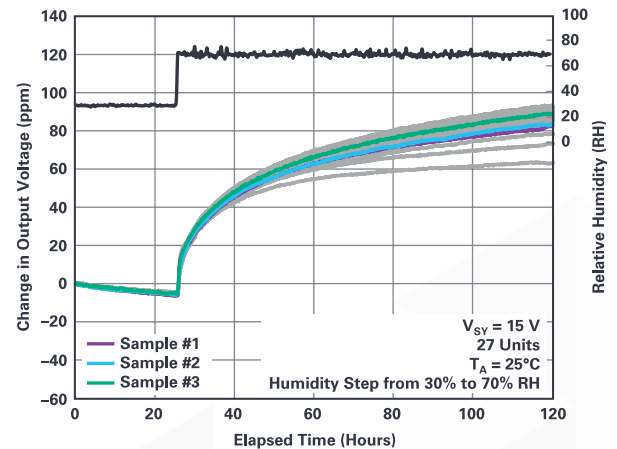


图5. 采用深浸式三步涂覆工艺，在ADR45xx参考电压表面涂覆HumiSeal 1B73丙烯酸涂层。

因为烘烤箱问题，本次测试无法超过96个小时。对30% RH到70% RH范围的数据实施规格化的步骤显示为90 ppm左右或2.3 ppm/% RH的漂移，这没有达到本应用过程想要达到的大幅改善效果，但喷涂涂层出现些微改善，当然也可以说，如果测试时间再长一些，这些微改善也会消失。表2对3次测试进行总结。

表2. 采用保形涂层的湿度测试总结

	ADR4525 塑料封装， 无涂层	ADR45xx 塑料封装， 1B73喷涂 涂层	ADR45xx 塑料封装， 1B73深浸式 涂层	ADR4525 陶瓷封装
测试时长	168	168	96	168
RH测试方法	20% RH至 80% RH	30% RH至 70% RH	30% RH至 70% RH	30% RH至 70% RH
输出漂移 结果	2.5 ppm/% RH	2.5 ppm/% RH	2.3 ppm/% RH	0.075 ppm/% RH

未来的测试可能采用其他类型的保形涂层（硅胶、橡胶等），应用过程也会做出许多变化。此外，在涂层之后进行截面分析也可以确认应用的涂层厚度是否达到了制造商要求的标准，以及某些边缘位置的涂层是否足够。总之，这些实验数据表明，陶瓷密封封装是防止湿气浸入的唯一理想防御方法。

结论

在采用仅仅10位目标精度的设计中（1/1000类型精度，或者5 V参考中的±5 mV），各种误差源可能会悄无声息地影响到精度。但是，如果您的精密仪器仪表系统的目标精度是16位甚至24位，

那么您必须考虑整个系统设计，包括PCB制造，以确保在设计整个生命周期内保证达到该精度。本文显示，确保湿度性能的理想方法就是采用密封封装，例如陶瓷，此外，保形涂层可以帮助减缓精密模拟电子器件受湿度影响的速度。当设计工程师的设计进入生产阶段时，会需要用到电子领域以外的技能，需要咨询涂层公司，以确保产品能在富有挑战性的环境下实现出色性能。“This argument holds water”这句话通常意味着您的论点有价值而且是正确的。在这种情况下，遵循最佳实践可以确保您的电压参考本身不会被水汽侵蚀，而是将水挡在外面，确保您的精密设计能够保持您所需的性能。这种设计方法可能存在缺陷，但是您的电压参考不会！

参考资料

ASTM E398-03, 用动态相对湿度测量法测定薄板材料水蒸汽渗透率的标准测试方法。美国材料和试验协会，2003年。

Bryant, James. “应用工程师问答—11：电压参考必须达到什么样的精度？”《模拟对话》，1992年1月。

HumiSeal 1A33聚氨酯保形涂层技术数据手册。HumiSeal，2019年。

“IPC-HDBK-830：保形涂层设计、选择和应用指南”。IPC，2002年10月。

“MT-087演示教程：电压参考。”ADI公司，2009年。



作者简介

Paul Perrault是一名高级现场应用工程师，工作地点在加拿大卡尔加里。他在ADI公司工作了17年，负责过100多种CPU放大器电源设计以及nA级传感器节点和节点间所有电流电平设计。他拥有加拿大萨斯喀彻温大学电气工程理学学士学位以及波特兰州立大学电气工程硕士学位。业余时间，他喜欢在乡间滑雪、在落基山石灰岩上攀岩、去当地的山丘爬山，并与年轻的家人一起在户外度过美好时光。联系方式：paul.perrault@analog.com。



作者简介

Rob Kiely是加州圣克拉拉仪器仪表与精密技术部的应用和营销工程师。他于2010年加入ADI公司。工作重点是精密信号链及产品，包括Σ-Δ ADC、精密放大器和基准电压源。Rob拥有爱尔兰利默里克大学的电气工程学士学位和VLSI系统工程硕士学位。联系方式：rob.kiely@analog.com。

