

## Application Note

## 如何调试 RH 传感器中的 RH 精度问题



Alex Thompson

## 摘要

相对湿度 (RH) 传感器是用于捕获环境数据的强大工具，但它们与其他集成电路 (IC) 和传感器类型有很大不同。电容式 RH 传感器 IC 采用空腔封装，其检测元件直接暴露在环境中。这种外露的传感器由两个关键元件组成：顶部聚合物层和底层电极。聚合物充当电容器的介电材料。当空气中的水分被聚合物吸收时，其相对介电常数会发生变化，从而导致电极上的电容发生可测量的变化。然后，这种变化会在内部转换为 RH 输出。

电容式 RH 传感器采用独特的芯片和封装结构，因此需要仔细处理并遵循特定的指导原则，以便随着时间的推移仍可保持指定的精度。本应用手册详细介绍了使用 RH 传感器时可能出现的常见问题，概述了防止典型测量误差来源的方法，并提供了缓解性能下降的技术。

通信接口问题（例如，I<sup>2</sup>C 误差）和特定化学效应产生的 RH 结果不在本文档的讨论范围内。

## 内容

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1 引言：为什么 RH 传感器表现为超出规格           | 2  |
| 1.1 RH 误差发生在哪里以及何时发生？            | 2  |
| 1.2 RH 误差的根本原因是什么？               | 3  |
| 1.3 案例研究                         | 4  |
| 2 定义：RH 精度的关键术语                  | 5  |
| 3 初始故障排除步骤                       | 7  |
| 3.1 初始验证步骤                       | 7  |
| 3.2 诊断问题                         | 7  |
| 4 RH 误差的常见来源 — 预防和缓解             | 8  |
| 4.1 PCB 和外壳设计注意事项                | 8  |
| 4.2 组装、焊接和制造过程                   | 9  |
| 4.3 组装后的再水合                      | 11 |
| 4.4 测试设置和环境                      | 12 |
| 4.5 储存和处理                        | 16 |
| 4.6 化学污染                         | 17 |
| 4.7 运行条件：应用环境条件和影响               | 20 |
| 4.8 RH 精度调试流程图                   | 22 |
| 5 总结：设计和调试 RH 精度                 | 23 |
| 6 参考资料                           | 24 |
| 7 附录                             | 25 |
| 7.1 案例研究 1：湿度引起的 RH 正偏移          | 25 |
| 7.2 案例研究 2：100%RH 环境下的渐变 RH 精度漂移 | 27 |
| 7.3 案例研究 3：组装和热效应综合因素            | 29 |

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言：为什么 RH 传感器表现为超出规格

在使用 RH 传感器时，由于环境条件或错误处理等外部因素，用户偶尔会观察到超出数据表规格的精度偏差。虽然这些传感器设计为在指定的 RH 精度限值范围内运行，但某些因素可能会导致报告的 RH 值相对于预期范围向上或向下偏移。确定和解决此类偏差需要采用一种系统方法，首先是如何将传感器集成到系统中，然后是制造过程，最后是评估最终使用环境的条件。

确定和解决此类偏差需要一种分为三个阶段的系统方法：

1. 找出 RH 误差，并确定在生产和部署周期中何时产生了这些误差。
2. 确定 RH 误差的来源，并了解对 RH 传感器性能的影响。
3. 了解 RH 误差源的潜在根本原因，以便于防止或减轻影响。

本文档的结构旨在支持迭代性或特定于阶段的故障排除。建议用户导航至与当前设计阶段或观察到的问题相关的部分，以获得有关诊断、预防和缓解 RH 精度偏差的定向指导。

### 1.1 RH 误差发生在哪里以及何时发生？

图 1-1 展示了从设计到部署的典型流程，从评估 EVM 开始，到最后应用用例结束。在该流程的每个阶段，都可能产生 RH 精度误差。为了有效地排除 RH 精度误差的根本原因，TI 建议先确定误差首次出现的阶段，然后反向跟踪问题。例如，如果在使用评估模块 (EVM) 进行评估期间检测到 RH 精度误差，则误差必然与环境影响、发热效应、化学品暴露或原型/生产测试方法不正确有关。这是因为 EVM 提供了已知良好的 PCB 设计和组装过程。

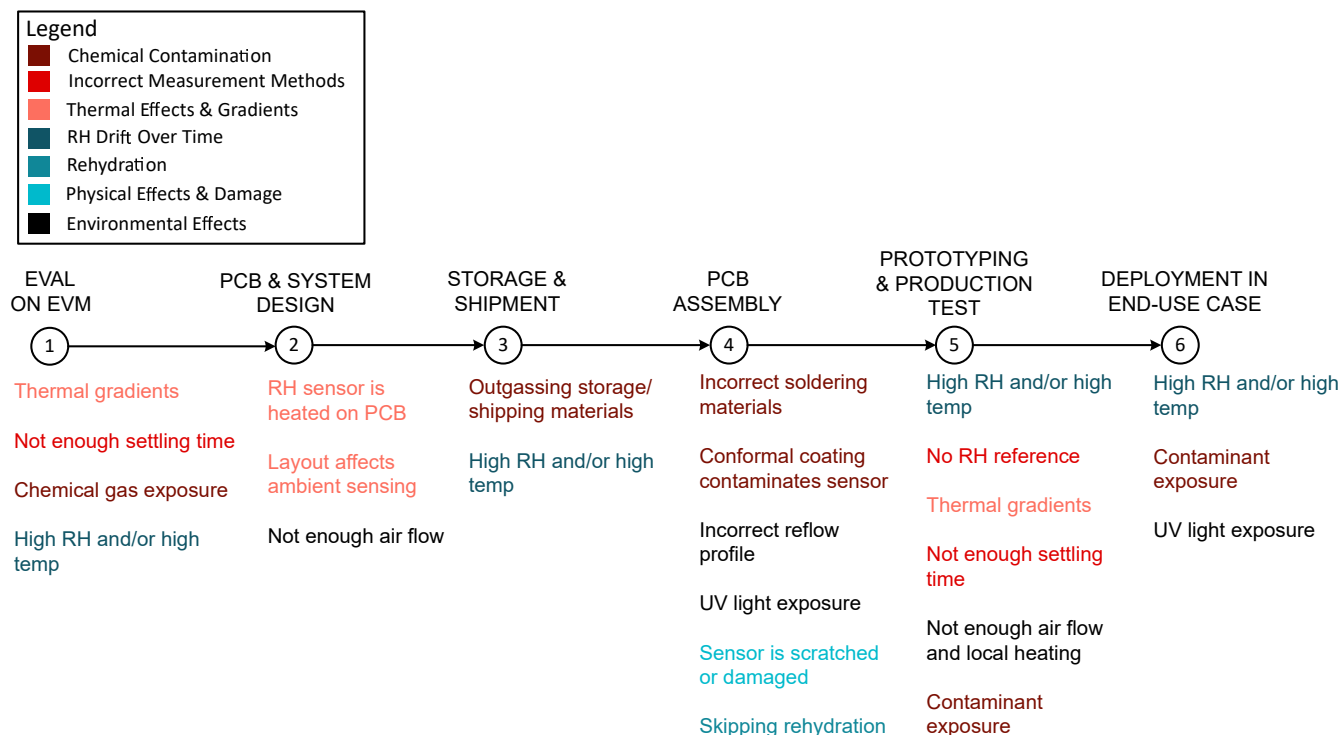


图 1-1. RH 传感器设计示例时间轴

RH 误差的不同来源在图 1-1 中采用颜色编码，本文档的以下章节将对此进行更深入的讨论：

- 组装、焊接和制造过程、储存和处理以及化学污染中讨论了化学污染。
- 测试设置和环境中讨论了不正确的测量方法。
- PCB 和外壳设计注意事项、储存和处理以及测试设置和环境中讨论了热效应和梯度。
- 储存和处理以及运行条件：应用环境条件和影响中讨论了 RH 随时间变化的漂移
- 组装后的再水合中讨论了再水合
- 组装、焊接和制造过程、储存和处理以及化学污染中讨论了物理影响和损坏。
- PCB 和外壳设计注意事项、组装、焊接和制造过程以及运行条件：应用环境条件和影响中讨论了环境影响。

## 1.2 RH 误差的根本原因是什么？

图 1-2 中的鱼骨图提供了有关 RH 精度误差最常见来源的根本原因视角。从左到右阅读图表，误差类别根据误差源列出，其中有几个可能出现在生产过程中的多个点。例如，如果测试室中的温度不均匀，则在测试阶段可能会对 RH 传感器产生热效应，但也可能由于 PCB 设计而产生热效应。

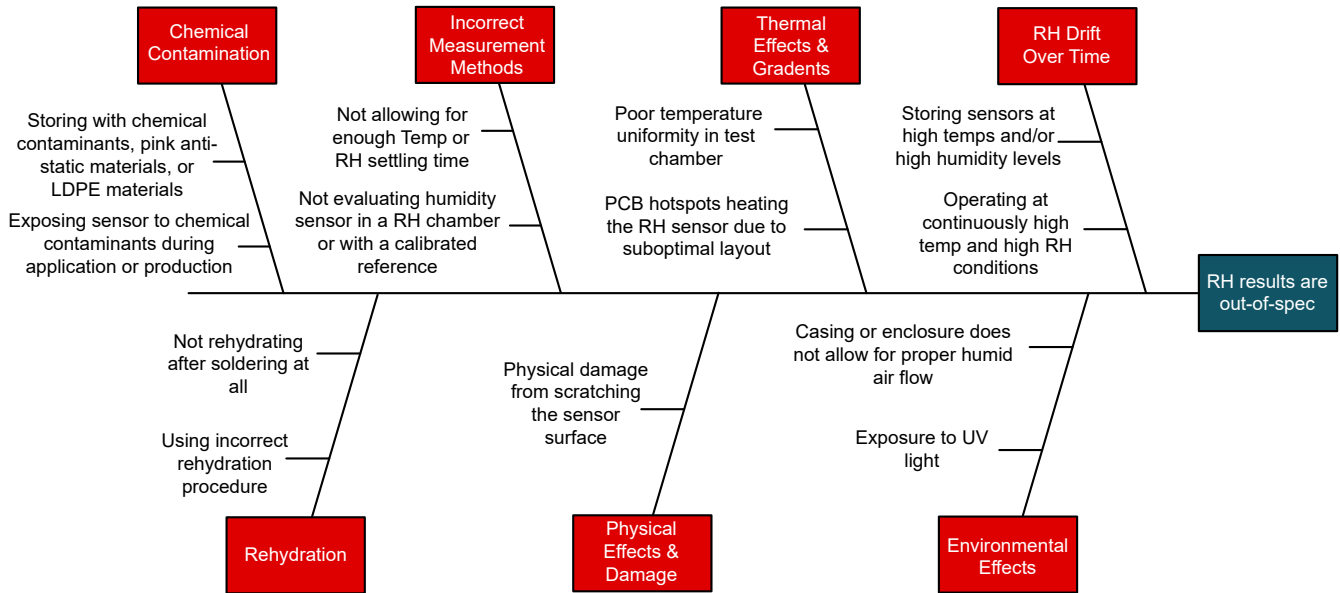


图 1-2. RH 误差的常见根本原因

本文档还将这些误差源归类为开发、生产和应用的不同阶段，以帮助用户了解可能产生误差的位置。此外，本文档还提供了一些案例研究作为示例来说明 RH 精度调试过程，并结合图 4-11 中的流程图帮助引导用户找出根本原因。

本文档通过三个重要方式对七种主要误差源分别进行了检查：

1. 对 RH 精度的潜在影响。
2. 预防发生策略。
3. 预防不可行时缓解影响的方法。

### 1.3 案例研究

本应用手册末尾的附录中提供了三个案例研究，展示了如何将所概述的原则应用于实践。每个示例都从未知来源的 RH 精度问题开始。通过使用本指南中描述的方法进行系统分析，确定并解决了根本原因。所选的案例研究代表着一系列复杂情况，需要强调的是，虽然一些 RH 精度问题可以得以轻松解决，但其他问题需要进行更广泛的研究和设计修改。

- **案例研究 1：**用户观察到持续存在约 3.5% RH 的正 RH 偏移，使传感器超出数据表限值。随后，这个问题被限制到来自特定 PCB 制造商的器件中。根本原因分析指向组装过程，这是由于该工厂的传感器存储条件造成的。受影响的传感器已通过受控的烘烤程序成功恢复，已恢复到数据表规格。
- **案例研究 2：**在室外安装中，用户发现 RH 传感器最初按预期运行，但随着时间的推移，逐渐无法在高湿度条件下报告 100% RH。报告的最大 RH 逐渐下降，这表明由于长时间暴露于饱和环境，传感器性能会下降。
- **案例研究 3：**在气体检测应用中，客户在旧 PCB 设计和新 PCB 设计上测试了两款 RH 传感器产品（HDC2021 和 HDC3021）。HDC2021 报告了正确的 RH 结果，而 HDC3021 报告了不正确的 RH 结果。研究发现，化学污染和 PCB 布局误差都会导致影响所有器件的问题，而相反的效果会掩盖传感器中 RH 误差的全貌。

## 2 定义：RH 精度的关键术语

本节定义了讨论 RH 精度时使用的关键术语。了解本节中介绍的概念，对于使用本文档第 4 节中介绍的方法评估、诊断、防止和缓解 RH 精度误差至关重要。

- 检测聚合物：电容式 RH 传感器利用暴露的聚合物捕获空气中的水分。这种捕获的水分会填充聚合物中的空隙，从而改变聚合物的介电常数。介电常数的这种变化会导致聚合物下方的检测电极的电容发生变化。温度和湿度条件还会影响聚合物检测潮湿空气以及其他多余成分（例如其他化学品）的方式。图 2-1 展示了简化的传感器结构，其中聚合物充当从空气中捕获水分的介质。

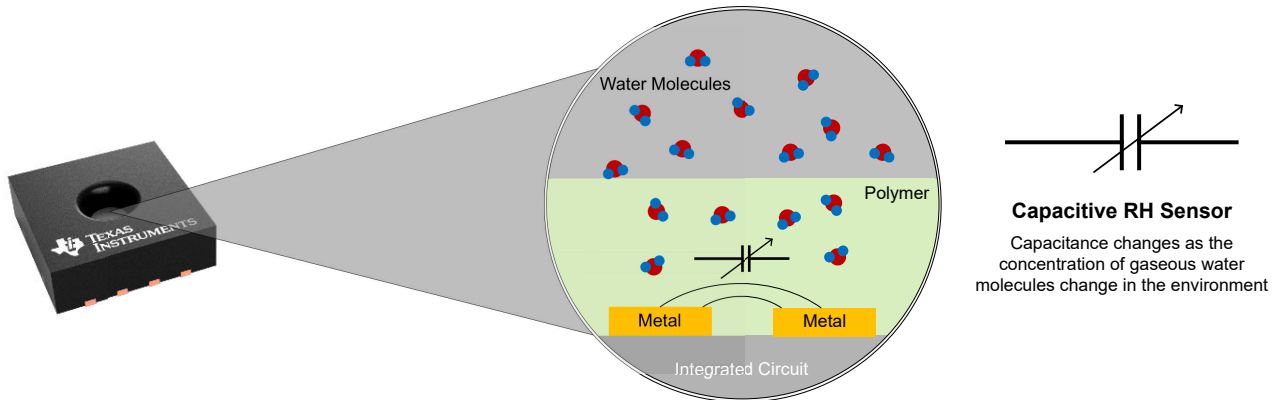


图 2-1. 检测聚合物示例

- RH 误差**：RH 传感器湿度的测量值与经过校准的基准值之间的差异。
- RH 迟滞**：上升曲线（环境 RH 增加时的 RH 误差）或下降曲线（环境 RH 减小时的 RH 误差）与上升曲线和下降曲线的中心平均值之间的差异。正 RH 迟滞是中心平均值与下降曲线之间的间隙，负 RH 迟滞是中心平均值与上升曲线之间的间隙。之所以会出现迟滞，是因为检测聚合物记忆了以前检测到的湿度条件。因此，如果以前暴露于低 RH 条件则 RH 传感器的 RH 误差将略微为负，以前暴露于高 RH 条件则略微为正。RH 迟滞的确切形状可能随不同的环境温度而变化。图 2-2 展示了“上升和下降”曲线两个不同的视图，一个显示 RH 误差与参考 RH 间的关系，另一个显示测得的 RH 与参考 RH 间的关系。

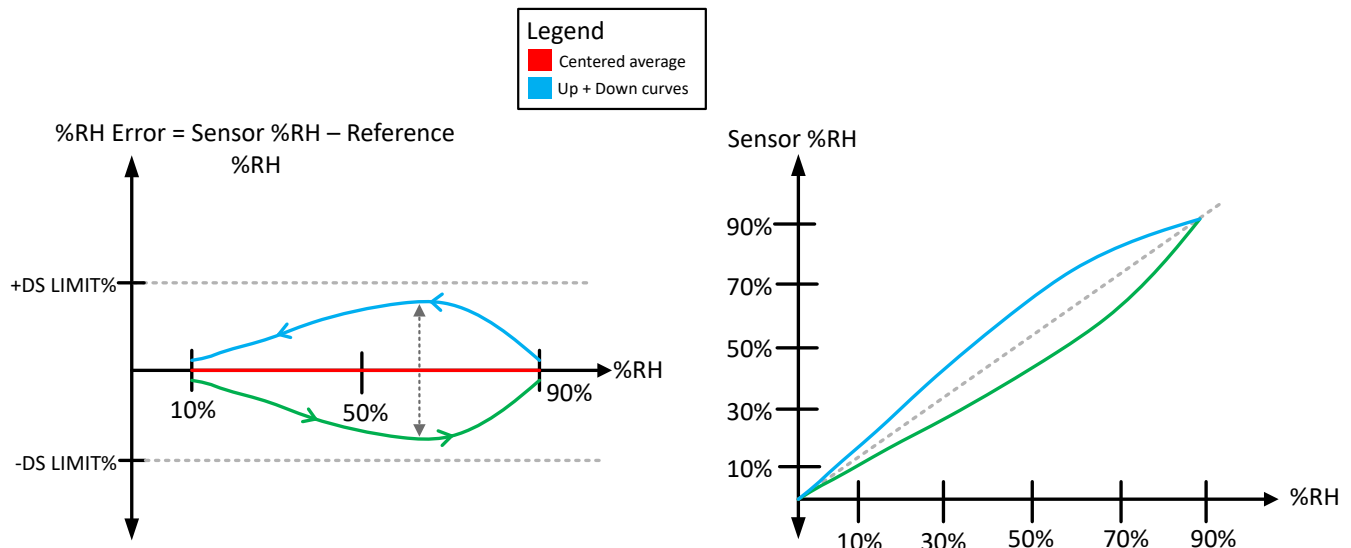


图 2-2. RH 迟滞示例

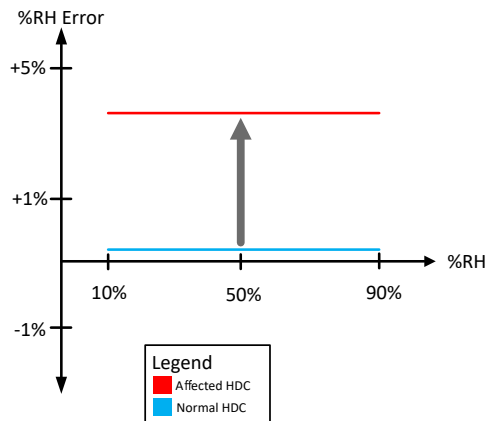


图 2-3. RH 偏移误差示例

- **RH 偏移**：指 RH 误差的正偏移或负偏移，在不同的环境 RH 水平和温度下保持恒定。图 2-3 演示了 %RH 误差如何在不同 RH 水平下平稳地升高。
- **RH 增益**：指相对于湿度范围不恒定的 RH 误差移位；例如，正 RH 增益可能在低湿度下 RH 误差较低、在高湿度下 RH 误差较高，而负 RH 增益可能在低湿度下 RH 误差较高、在高湿度下 RH 误差较低。图 2-4 显示了两个 RH 增益示例。左侧是负 RH 增益的示例，右侧是正 RH 增益的示例。请注意，在低 RH 水平下，增益移位的影响可能很小，但随着 RH 的增加，影响变得更加明显。在许多实际案例下，RH 偏移和 RH 增益可以组合在一起。

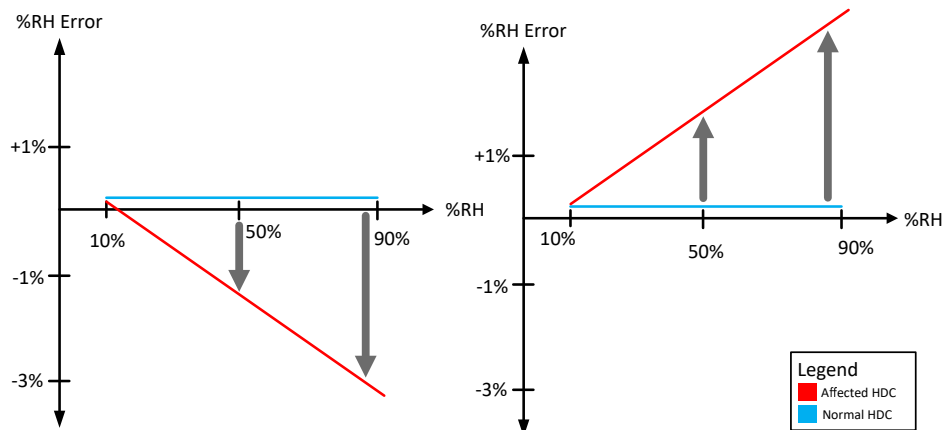


图 2-4. RH 增益误差示例

- **VOC**：挥发性有机化合物。VOC 是有机化学物质，通常是人造产品，容易蒸发到空气中，也称为“释放气体”。VOC 会干扰检测聚合物的正常运行，从而对 RH 精度产生负面影响。由于 VOC 会在环境条件下蒸发到空气中，因此它们是聚合物型湿度传感器的常见化学污染源。
- **MSDS**：材料安全数据表。给定产品（例如，特定保形涂层、装运泡沫材料、焊膏等）的 MSDS 可详细说明产品中的大多数（即使非全部）化学品。获取和阅读 MSDS 是避免潜在化学污染物的关键，以使用户选择的产品可最大限度地减少对 RH 精度的影响。
- **SEM**：扫描电子显微镜。用于拍摄检测聚合物的高分辨率图像，有助于识别沉积的化学污染物。
- **EDX**：能量色散 X 射线光谱分析。一种故障分析技术，通过对检测聚合物上的点进行光谱分析来显示化学成分。在确定化学污染物的性质方面非常有用。由于需要金属沉积薄层，它被视为破坏性故障分析，因此在经过 EDX 检查的器件上无法进一步进行 RH 测试。



### 3 初始故障排除步骤

在尝试诊断或提高传感器的 RH 精度之前，必须首先确认实际 RH 精度问题存在。虽然本文档重点介绍影响 RH 精度的系统和环境因素，但这些初始验证步骤对于排除基本的功能或设置问题至关重要。这些验证步骤可以确定问题不在于湿度精度而在于其他方面，从而节省用户时间。

#### 3.1 初始验证步骤

1. **执行 A-B-A 交换：**按照所有焊接预防措施，使用已知良好的装置更换可疑的传感器。如果问题在同一 PCB 上仍然存在，则根本原因可能与电路板或系统集成有关。如果问题随传感器出现，则器件本身可能存在故障。此方法通常称为 A-B-A 交换方法（请参阅[故障品处理指南](#)）。
2. **检查去耦是否正确：**确保在传感器的 VDD 和 GND 引脚之间（尽可能靠近它们）放置一个去耦电容器。电源去耦不良会导致噪声或不稳定。
3. **检查是否存在物理损坏：**目视检查传感器封装和暴露的空腔，以识别任何损坏、污染或异物的迹象。
4. **验证通信：**使用 [SysConfig](#) 中 [ASC Studio](#) 上提供的 TI 代码示例确认 I<sup>2</sup>C 通信和器件初始化正确。ASC Studio 是一款与微控制器无关的基于 GUI 的代码生成器，可提供所需的示例代码。检查是否为 SDA 和 SCL 引脚安装了上拉电阻器。
  - a. 数字通信错误的另一个迹象是，RH 传感器的 %RH 输出一直为 100% 或 0% RH，同时温度读数为 130°C 或 -45°C（对于 HDC1x 和 HDC2x 为 125°C 或 -40°C）。这意味着传感器报告 0x0000 或 0xFFFF，表示存在数字通信错误。

#### 3.2 诊断问题

一旦这些基本检查确认器件正常运行并且存在更系统性的 RH 精度问题，以下诊断问题有助于展开问题并指导进行进一步的根本原因分析：

1. 该 RH 误差在所有器件上观察到，还是仅在子集上观察到？
2. 是否所有受影响的传感器都来自特定批次或生产组？
3. 精度误差是静态、间歇性还是随时间推移逐渐恶化？
4. RH 传感器是否报告正确的温度结果？
5. RH 误差有什么形式？是否存在一致的正偏移、负增益或行为组合？
6. RH 误差首先出现在开发或生产过程中的哪个阶段？
7. 传感器的最终使用环境是什么？例如：
  - a. 传感器是在室内、室外还是工业环境中使用？
  - b. 涉及哪些温度范围？湿度范围是多少？
  - c. 传感器是否长期暴露于湿度波动或相对稳定的条件？
  - d. 要检测的环境空气实际上是否到达 RH 传感器？
  - e. 系统是否允许 RH 稳定下来？

对上述问题的回答允许用户浏览[图 4-11](#)中的[节 4.8](#)。此流程图旨在作为指南，帮助用户导航到他们的 RH 误差源的来源，并加快调试过程。一旦用户确定了可能存在的问题区域，请导航至[节 4](#)中的相应主题。

## 4 RH 误差的常见来源 — 预防和缓解

本节讨论 RH 传感器中 RH 精度误差的多个常见来源。每个主题都进一步分为子主题，更详细地讨论相关解释、预防策略、缓解方法和最佳实践。不同的章节未按照重要性、严重性或发生几率进行排序，而是按照在工程设计过程中可能出现的顺序来展示这些主题。它们可以按任何顺序阅读。本节为用户提供了优化设计所需的工具，并更大限度地降低了不必要的 RH 精度风险。

### 4.1 PCB 和外壳设计注意事项

在开发过程的早期，未优化的 PCB 布局或外壳设计会对 RH 精度产生显著影响。关键因素包括 PCB 上的热传递和外壳内的气流管理，这两个因素都会影响传感器精确测量环境湿度的能力。

#### 4.1.1 PCB 到 RH 传感器的热传递

从其他来源传导的热能可能会干扰传感器精确检测环境空气温度和 RH 的能力。传感器局部发热会导致 RH 传感器的结温与环境空气温度不匹配。由于 RH 与温度（在恒定压力下）成反比，因此这会导致报告的 RH 值较低，而这些 RH 值并未反映真实的环境条件。这种影响表现为负 RH 偏移和增益误差。

常见的热源包括附近的功率耗散元件以及高导热性的铜平面。一般规则：传感器温度相对于环境温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，RH 读数会下降约 3% RH（3%RH 相加，非相乘）。该值随环境温度和湿度水平而变化，但有助于掌握 RH 因温度波动而可能变化的程度。在启动后逐渐升温的系统中，RH 读数将随着本地电路板温度的升高而逐渐向下漂移。

为了防止 PCB 设计导致的 RH 精度误差：

- 遵循数据表中的布局指南对湿度传感器进行热隔离。
- 避免将发热元件放置在 RH 传感器附近。
- 切勿在 RH 传感器封装下方或周围布设延伸到 PCB 其他部分的铜平面，那样它们会将热量从 PCB 上的其他位置传导至器件。
- 切勿使 RH 传感器直接暴露在阳光或强光下。

图 4-1 是一个使用 HDC3020 进行优化以检测环境湿度和温度的 PCB 布局示例。

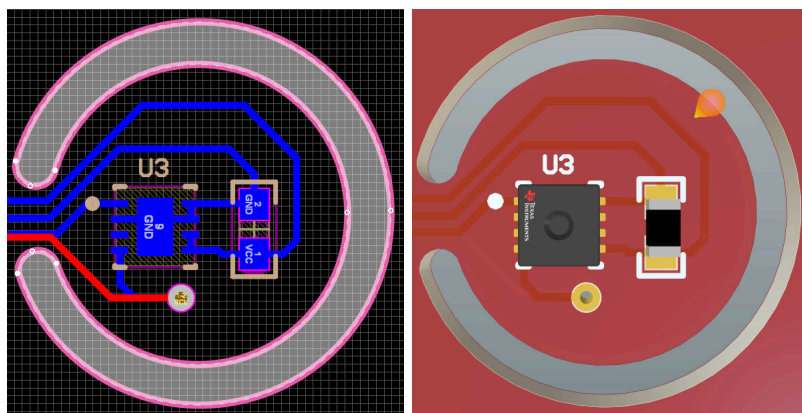


图 4-1. HDC3020 PCB 布局示例，在 HDC3020 周围开有槽口

优化后的布局示例在传感器周围有一个圆形槽，可防止热量通过 PCB 材料传导至传感器。热量通过空气传递的效果相对较差。在  $25^{\circ}\text{C}$  时，空气的热导率为  $0.026\text{W/mK}$ 。同时，作为常见的 PCB 电介质材料，FR4 的热导率为  $0.2\text{W/mK}$ 。使用 PCB 切口对 RH 传感器进行热隔离的优势接近 10 倍。

请注意，传感器下方不应有铜平面。铜的热导率高达  $400\text{W/mK}$ ，因此任何共用的铜平面都可以轻松地传递 PCB 上其他元件散发的热量。

如有可能，将 RH 传感器放置在 PCB 边缘或角落，远离热源。小 PCB 扩展件可以进一步隔离传感器并增加与环境气流的接触。如需更多指导，请参阅[优化湿度传感器的布局 and 布线](#)，以获得能够尽可能提高 RH 传感器检测环境温度的能力的 PCB 设计示例。



在图 4-2 中，左侧的 PCB 设计增加了空气间隙以及 RH 传感器与 PCB 上其他元件的物理隔离，因此更好地优化了热隔离。右侧的 PCB 设计几乎或完全没有热隔离，这使得湿度传感器易受 PCB 上的热源影响，因而产生 RH 误差。

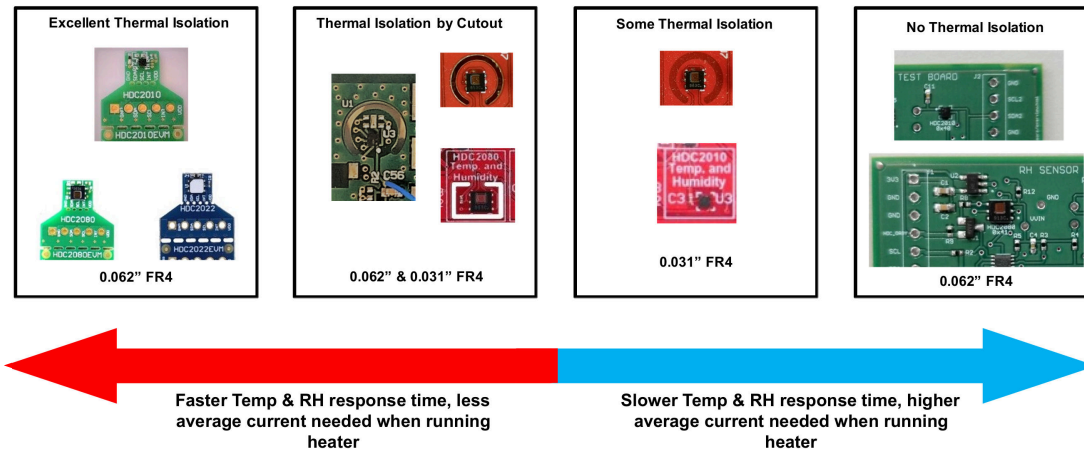


图 4-2. 隔热 PCB 设计示例

#### 4.1.2 电源噪声和模拟 RH 传感器

对于 HDC3120 等模拟输出 RH 传感器，电源噪声可能会在 RH 和温度读数中导致误差。之所以出现这种情况，是因为 HDC3120 是一款比例式器件，将 VDD 用作其输出 DAC 的基准。VDD 线路上的噪声或纹波直接转化为测量误差。

为了尽量减少这些影响：

- 尽可能靠近 RH 传感器的 VDD 引脚放置旁路电容器。
- 使用干净的低噪声稳压器为 VDD 供电。
- 避免在大环路中布置 VDD 布线，否则它们可能会充当天线并导致耦合。

正确的电源滤波和 PCB 布局对于确保 RH 传感器的高精度模拟输出至关重要。

#### 4.1.3 外壳设计和气流注意事项

外壳设计在实现准确的 RH 测量方面发挥着关键作用。在许多应用中，RH 传感器放置在 PCB 旁边的保护外壳内，以使其免受水、污垢/灰尘或化学品等环境因素影响。虽然这种方法可以保护传感器，但还需要特别注意气流设计，以确保传感器暴露在环境空气中并可以报告代表性 RH 值。

如果无法从外部环境获得足够的气流，传感器可能仅对外壳内部的空气进行采样，这可能会因 PCB 上的元件产生的热量而发生热偏置。随着温度升高，相对湿度会降低，因此这种局部热效应会降低测得的 RH。

为了更大限度地减少与空气流量相关的 RH 误差：

- 外壳具有通风孔或气槽，位置应尽可能靠近 RH 传感器。
- 避免使开口位于传感器的暴露腔体正上方，因为那样会增加对液体、灰尘或化学污染物的易感性。
- 确保外壳材料和设计不会蓄热或限制传感器上的被动气流。

## 4.2 组装、焊接和制造过程

组装和焊接过程会对 RH 传感器性能产生重大风险，特别是因为这些步骤通常委托给第三方供应商，或在系统集成过程中被忽略。虽然大多数 IC 都是例行焊接，但这对空腔 RH 传感器来说是一个关键漏洞点，通常是产生精度问题的最早阶段。

#### 4.2.1 组装说明：应当避免

在组装过程中可能会出现多种误差机制，必须尽力避免 PCB 组装 (PCBA) 过程中出现以下常见的 RH 精度误差源：

- **热应力：**暴露于多个高温回流循环可能会导致传感器脱水，表现为 RH 负偏移。

- **化学污染：**电路板清洁剂或某些助焊剂等材料中的挥发性有机化合物 (VOC) 会污染传感器，因而导致 RH 偏移或增益发生变化。
- **焊接技术不当：**使用非推荐的回流焊温度曲线、波动焊接或手工焊接可能会在传感器腔体中引入金属颗粒或助焊剂残留物，因而降低性能。还必须避免将保形涂层沉积在非胶带盖封装选件上，否则传感器腔体或滤膜会因涂层而无法通气，并且检测 RH 的能力将受到影响。
- **离子污染物：**接触盐或盐水之类离子物质会污染 RH 传感器，必须严格避免接触。离子污染表现为高环境 RH 下可能较大的 RH 负误差。

#### 4.2.2 组装说明：最佳实践

为了确保在组装过程中进行正确处理，请遵循器件数据表和器件用户指南中的详细指导原则。主要建议包括：

- **组装顺序**
  - 组装过程的最后一步是安装 RH 传感器。
- **回流焊：**
  - 始终采用 IPC/JEDEC J-STD-020 标准曲线，峰值温度为 260°C。
  - 限制为一次回流焊，避免返工。
- **A-B-A 交换例外：**
  - 如果需要返工（例如出于诊断目的），请遵循以下预防措施：
    - 尽量减少处理。
    - 使用热风枪干净地拆除传感器，无需额外使用助焊剂。
    - 拆卸后执行再水合，因为传感器可能已暴露于干燥热量。
- **焊膏和清洁：**
  - 使用免清洗焊膏。切勿在组装后清洁电路板。
  - 如果需要清洁，只能使用蒸馏水。
  - 验证使用的所有材料均无有害化学品（请参阅 MSDS 文档）。
  - 示例：**Kester R276** 是推荐使用的免清洗焊膏，经证实可与 TI RH 传感器兼容。
- **避免化学品暴露：**
  - 避免使用在烘烤或固化过程中会产生 VOC 的材料。
  - 污染物示例包括：PCB 清洗化学品、粘合剂、环氧树脂、一些保形涂层以及释气副产物。
- **避免紫外光：**
  - 避免将 RH 传感器暴露在紫外光下。紫外光可能会损坏检测聚合物，并产生不可逆转的 RH 误差。
- **机械保护：**
  - 切勿使用高压气流或超声波清洁来处理传感器。
  - 如果需要，使用低压无油除尘法。
- **保形涂层：**
  - 禁止直接涂抹在传感器腔体上，否则会妨碍环境 RH 测量
    - 确保在固化过程中保护腔体。确保选择在固化过程中或固化后不会释放气体的保形涂层，以降低 RH 传感器受到气体化学污染的风险。

### 4.2.3 组装过程中的传感器腔体保护

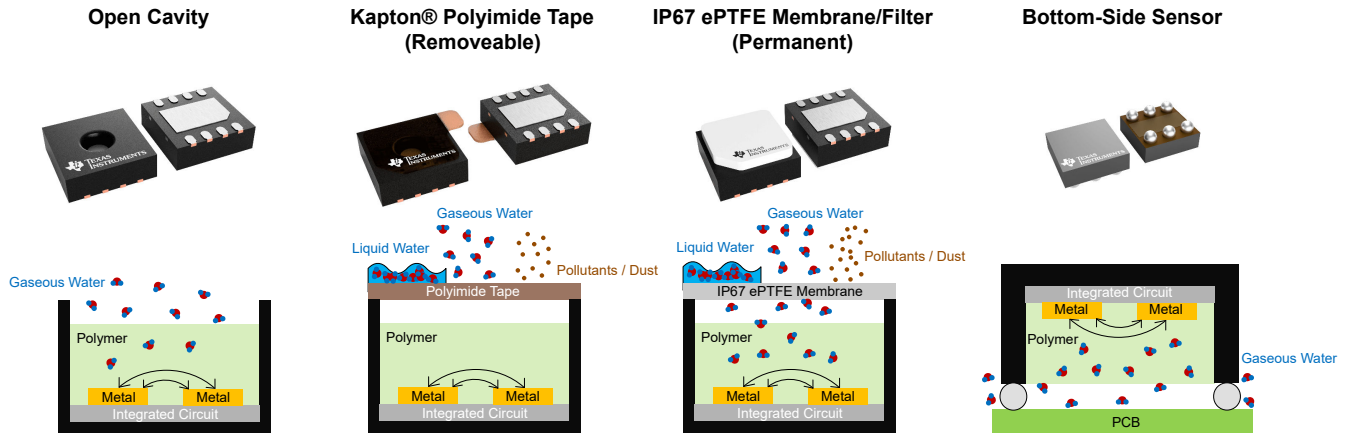


图 4-3. HDC3x 的不同封装选项

图 4-3 展示了聚酰亚胺胶带如何保护 HDC3021 以及 IP67 级滤膜如何保护 HDC3022 免受 PCBA 过程中引入的化学污染。

在组装过程中保护传感器免受物理和化学污染：

- 使用聚酰亚胺胶带遮住传感器腔体。
- HDC2021 和 HDC3021 之类的器件出厂时随附可除去的聚酰亚胺胶带。该胶带：
  - 在 SMT 过程和保形涂层形成期间保护传感器免受污染。
  - 耐化学腐蚀并充当物理屏障。

除胶带说明：

1. 使用 ESD 安全镊子组装后，除去胶带。
2. 捏住右上角的无粘性压片，朝着左下角对角剥离，向上提起以避免接触传感器表面并避免损坏。

**无胶带盖的传感器注意事项：**对于无盖器件 (HDC1x、HDC2080、HDC3020、HDC3120) 和带 IP67 永久滤膜的器件 (HDC2022、HDC3022)：

- 如果需要保形涂层，则在涂层形成过程中手动涂抹聚酰亚胺或 Kapton 胶带以保护滤膜。
- 确保涂层未接触到滤膜，因为那样会阻止湿气进入，因而导致 RH 读数不准确。

### 4.3 组装后的再水合

使用 RH 传感器时，再水合是一个经常被忽视和误解的步骤。再水合是组装后通过将水分重新引入检测聚合物来恢复 RH 传感器的过程。此过程涉及将组装好的传感器置于受控的 RH 和温度环境中几天。跳过此步骤会导致 RH 负偏移并增加迟滞。

#### 4.3.1 焊接后恢复传感器精度

再水合可使检测聚合物恢复在高温组装步骤（例如回流焊或烘烤）中可能失去的水分。这些步骤会使传感器聚合物变干燥。如果不进行再水合，RH 传感器可能会表现出迟滞增加和负 RH 偏移（尤其是在较高的湿度水平下）。图 4-4（红线）显示了这种迟滞增加和负 RH 偏移的影响。

再水合后这些误差将变为零，从而确保传感器的性能符合规格。图 4-4 中的蓝线显示了再水合后恢复的 RH 误差。

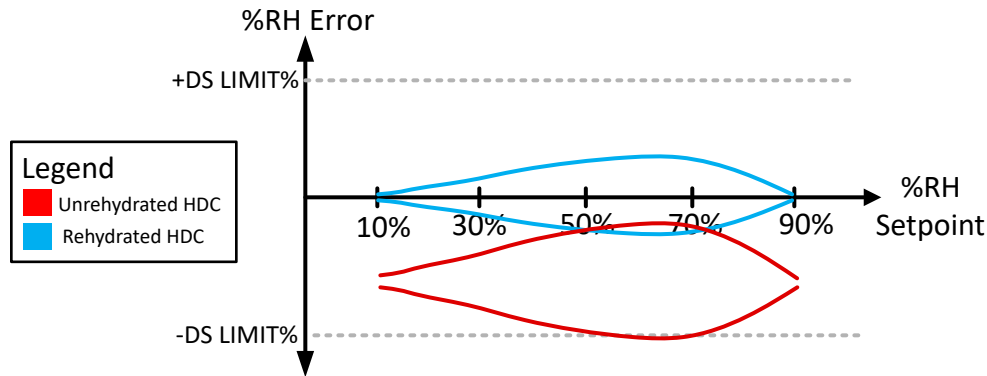


图 4-4. 再水合对 RH 精度的影响示例

#### 4.3.2 再水合程序

请在不进行修改的情况下遵循数据表的再水合程序，以确保实现出色的传感器性能。跳过或缩短该过程会因高 RH 下的过度校正而导致持续的负 RH 误差或正 RH 误差。再水合应在 PCB 断电的情况下完成。这是为了避免 PCB 上的其他元件产生热量并通过 PCB 或空气将热量传递到 RH 传感器。随着温度升高，再水合曲线将发生变化，并且对 RH 精度的影响不可预测。

建议的再水合条件：

- HDC1x 和 HDC2x：20°C 至 30°C、30% RH 至 40% RH，持续 2 至 5 天
- HDC302x：25°C、50% RH，持续 5 小时
- HDC3120：25°C、80% RH，持续 2 天（48 小时）

在某些情况中，部署在最低 25°C 和 50%RH 的环境条件下时，传感器可能会自然地再水合。部署到高温/低 RH 环境（温度高于 30°C、%RH 低于 40%RH）时，应用中可能不会再水合。虽然不推荐，但是当再水合延迟不可接受时，这可以作为一种变通方法。但是，在聚合物完全重新吸收水分之前，预计 RH 会出现暂时性的负偏移。通过烘烤（例如，100°C 烘烤 5-12 小时）或激活集成式加热器，可以缓解极端潮湿环境中水分过多的情况。

#### 4.4 测试设置和环境

如果用户在工程过程中的任何点进行测试，那么拥有能够尽可能准确地测试 RH 传感器的测试装置非常重要。

RH 测试需要：

1. 经校准的 RH 和温度基准传感器
2. 稳定且受控的温度和湿度环境
3. 足够的趋稳时间

如果没有这些，可能会出现测量噪声和 RH 精度误差。

##### 4.4.1 RH 基准

使用 ISO/IEC 17025 校准的基准（例如，露点镜）和受控环境来验证 RH 传感器。此外，使用经过校准的湿度室在不同 RH 条件下评估 RH 传感器。湿度基准需要至少与受评估 RH 传感器的典型 RH 精度相当。例如，如果评估典型 RH 精度为  $\pm 0.5\%RH$  的 HDC3020，湿度基准至少需要达到  $\pm 0.5\%RH$  精度。如果不可用，请与 TI 经过验证的 EVM 进行比较。如果这两个条件都无法满足，请考虑使用经过认证的第三方实验室。

##### 4.4.2 设置均匀性：受控环境

受控湿度测试环境（例如，经过校准的环境测试室）可对温度和相对湿度进行精确调节。相比之下，不受控制的环境（例如室内环境条件）缺乏这种控制，并且受到温度梯度、气流和其他干扰所引起的波动影响。

即使是小于 1°C 或几个百分点的 RH（相对湿度）这样的微小变化，也可能产生显著的测试误差。这些误差可能会错误地暗示传感器超出规格或不稳定，表现为因环境条件变化而导致明显的 RH 偏移或读数不一致。

如果无法使用经过校准的 RH 室，则与不受控制的条件相比，最好在小型、受控、温度稳定的房间中进行测试。对于此类情况，在测试装置上放置遮盖物有助于稳定本地环境。在开始测量之前，务必使环境完全稳定。

如果无法获得受控环境，则在该装置周围创建局部化测试外壳。该外壳应当：

- 足够大，以便容纳所有被测传感器或组合件以及 RH 基准。
- 足够小，以使环境快速稳定。
- 与外部环境充分实现热隔离以确保温度稳定性。
- 具有小通风口以便于空气交换。
- 使用低速内部风扇来循环空气，并提高温度和 RH 均匀性。
  - 请记住，根据风扇以及外壳尺寸，风扇可能会因散热而对温度和 RH 噪声产生更大的影响。务必评估带有风扇和不带风扇的测试设置，以确定哪种设置最适合所测试的系统。

**受控与不受控湿度测试设置**演示了受控测试环境与不受控环境。受控设置位于 RH 室中，包括测试 PCB、风扇和 RH 基准。不受控制测试设置没有用于控制温度和湿度的测试室，完全暴露于阳光以及不断变化的温度和湿度水平等环境因素，并且容易受到外部污染物影响。

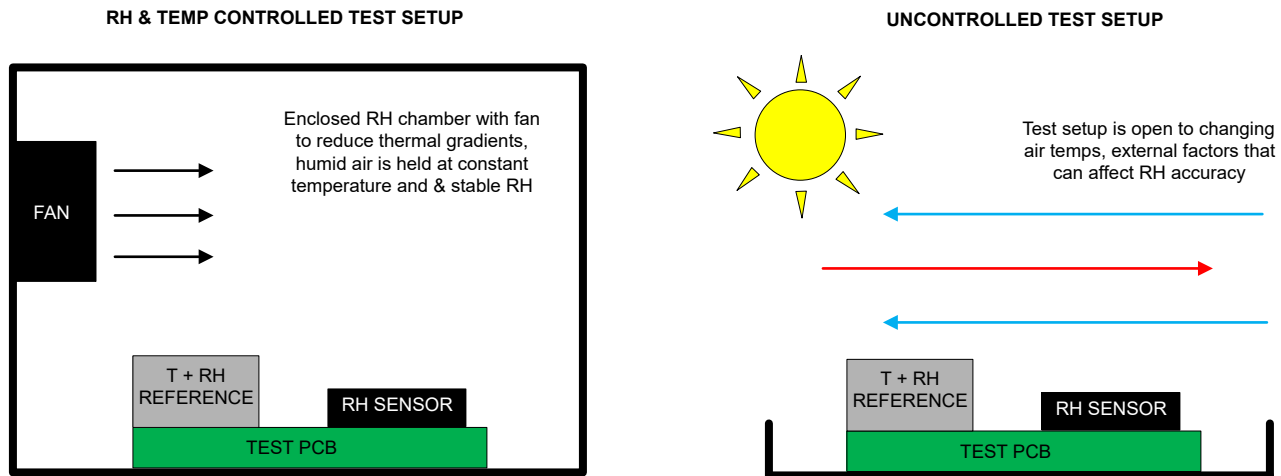


图 4-5. 受控与不受控制湿度测试设置



#### 4.4.3 设置均匀性：热梯度

测试环境中的热梯度会导致人工湿度测量误差。例如，当环境测试室达到其目标温度时，由于气流不均匀或热分布不佳，可能会形成热点或冷点。由于 RH 与温度的反比关系，即使是微小的差异（例如，最热点和最冷点之间  $0.2^{\circ}\text{C}$  的变化），也会导致高达 0.8% 的视在 RH 误差。即使传感器本身正常运行，此类差异也可能影响器件是否通过评估。这是因为温度梯度会导致传感器和基准实际出现不同的 RH 条件，因而导致测量结果不匹配。

虽然理想情况下在 RH 室中可实现完全的温度均匀性，但这通常不现实。温度梯度不应超过被测 RH 传感器的典型温度精度。例如，如果测试 HDC3020，典型的温度精度为  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。因此，RH 室的最大可接受热梯度为最冷点和最热点之间  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。这将保持 %RH 差异不超过  $\pm 0.4\%\text{RH}$ ，该值处于  $\pm 0.5\%$  的典型 RH 精度范围内。

图 4-6 显示了一个热梯度导致 RH 误差的真实示例。该误差在没有气流的情况下更明显，而在测试室中增加低速风扇以使空气循环并降低热梯度时，该误差降低（但未消除）。红色表示温度，蓝色表示 RH。

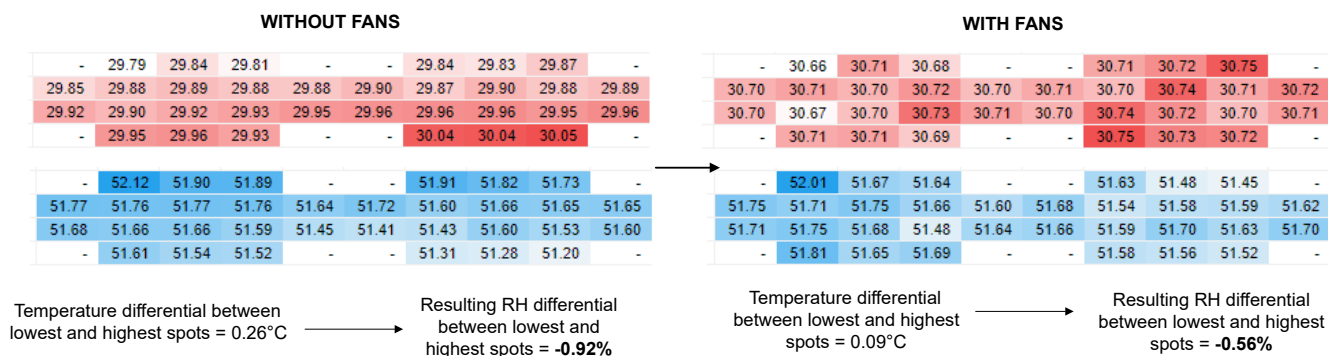


图 4-6. 湿度室热梯度示例

为了尽可能降低热梯度：

- 将传感器放置在尽可能靠近 RH 基准的位置。
- 在测试室内将传感器尽可能靠近地放置。
- 使用内部风扇改善空气循环和温度均匀性。
- 将传感器高度的气流限制为  $\leq 1\text{ m/s}$ 。如果需要更高的风扇速度才能实现混合，请将风扇放置在远离传感器的位置，以避免局部气流效应。

图 4-7 显示了用于增强循环和减少测试室内热变化的风扇设置。

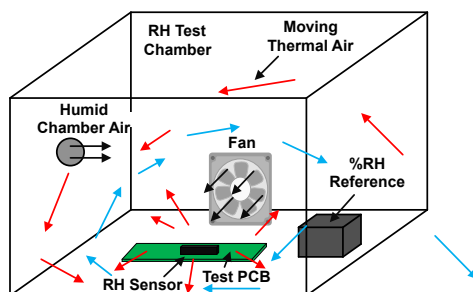


图 4-7. 空气以降低热梯度的湿度室

#### 4.4.4 趋稳时间

趋稳时间是指进行 RH 测量之前，湿度室等测试环境必须保持稳定设定点的持续时间。所需时间因测试室大小、响应特性（例如欠阻尼或过阻尼）和所需精度而异。如果测试室不稳定，环境 RH 可能会在测试期间继续漂移，从而在被测器件之间产生热梯度、噪声和人工测量偏差。

一般而言，如果之前没有可用的特性数据，在已经稳定的温度下，20 分钟的 %RH 稳定周期可作为合理的起点。每个湿度室都不相同，但 20 分钟通常可使 %RH 过冲和振荡稳定下来，同时不会将 RH 传感器过度暴露于大多数湿度室的特定 RH 设定点。



建议的稳定序列：

1. 首先稳定温度：设置所需的温度并使用中等 RH 水平 (20 – 50%) 以避免冷凝。让温度稳定到波动在  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  以内。根据系统的不同，这可能需要几个小时。
2. 接下来稳定湿度：温度稳定后，调整 RH 设定点。现在热条件已稳定，因此 RH 通常可以在大约 20 分钟内稳定到波动在  $\pm 0.2\%$  RH 内。

无论测试环境如何（无论是否使用受控测试室），都必须留出足够的时间来稳定温度和湿度。虽然每个 RH 设定点 20 至 30 分钟可作为良好的基准，但实际的稳定时间可能会有所不同，应通过实验进行确认。

**注意：**在高湿度水平 (RH > 70%) 下，将趋稳过程中的传感器暴露限制为所需的最短时间。长时间暴露于较高的 RH 将会导致过度吸湿，并且因传感器固有的迟滞而产生暂时的正 RH 偏移。为了最大程度地降低此风险，在高 RH 水平下避免每个设定点超过 30 分钟。

## 4.5 储存和处理

正确地存储和处理对于在整个产品生命周期中保持 RH 传感器精度至关重要。不正确的环境条件、不合适的存储材料或在处理过程中的物理损坏都可能会导致误差。

### 4.5.1 存储温度和湿度条件

存储指南适用于传感器的完整使用寿命，而不仅仅是部署前。RH 传感器应存储在远离光线直射、温度 20 - 30°C、湿度 30 - 50% RH 的稳定环境中。长时间暴露在 >70% RH 的条件下可能导致暂时性 RH 偏移或增益。严重暴露（例如，85°C/85% RH）会导致不可逆转的性能下降。

要从过度湿度暴露中恢复，在 100°C 和 <5% RH 的条件下烘烤传感器 5 - 10 小时，然后根据数据表再水合。烘烤有助于缓解长期 RH 漂移或污染影响，但并非总是能够消除。

### 4.5.2 存储材料

常见的防静电包装材料，例如粉色泡沫，粉色聚乙烯袋和 LDPE（低密度聚乙烯）袋或包装材料，可能会释放出 VOC，它们会降低 RH 传感器的精度。这些污染物可能会导致偏移或增益误差，具体取决于暴露的类型、浓度和持续时间。包装材料中含有防静电剂（如乙氧基化胺）或着色剂（如胺），也会降低 RH 传感器的性能。RH 传感器不应与任何释放气体的化学物质存放在一起或在其附近存放。

存储和运输中使用密封的金属化防静电袋和不含胺、聚乙烯/LDPE 的包装材料。

图 4-8 展示了一些含有胺添加剂的常见粉红色泡沫示例，禁止将它们与任何 TI RH 传感器一起使用。



图 4-8. 粉色泡沫示例

### 4.5.3 MSL 级别与 RH 传感器有什么关系？

有关存储条件的常见混淆来源是 MSL 级别。MSL 表示湿敏级别，是一种存储等级，告知用户在什么条件下可以存储 IC。表 4-1 展示了不同的 MSL 级别。

表 4-1. 30°C 下的工厂车间寿命

| MSL | 车间寿命                   | 相对湿度   |
|-----|------------------------|--------|
| 1   | 无限                     | 85% RH |
| 2   | 1 年                    | 60% RH |
| 2a  | 4 周                    |        |
| 3   | 168 小时                 |        |
| 4   | 72 小时                  |        |
| 5   | 48 小时                  |        |
| 5a  | 24 小时                  |        |
| 6   | 使用前烘烤，并在标签上所注的时间内进行回流焊 |        |

TI 的 RH 传感器等级为 MSL-1，这意味着可以将传感器无限期存储在封装中，而不会影响机械可靠性。但是，MSL 等级仅涉及封装完整性，而不涉及检测性能。

例如，将传感器在 30°C /85% RH 条件下存储一年可以保持封装质量，但由于湿气渗入聚合物中，RH 精度降低。因此，传感器必须存储在比 MSL 等级建议更冷 (20°C - 30°C)、更干燥 (30%RH 至 50%RH) 的环境中。

有关 MSL 的更多信息，请参阅 [MSL 等级和回流焊曲线](#)。

### 4.5.4 处理最佳实践

[HDC302x 器件用户指南](#)详细介绍了存储和处理指导原则。

错误处理（例如，使用镊子划伤传感器腔体）可能会导致不可逆转的机械损坏。尽可能使用真空笔。如果需要使用镊子，请避免接触传感器元件。明显损坏的 RH 传感器应当丢弃并更换。

## 4.6 化学污染

化学污染是指检测聚合物的吸湿性因外部化学物质而发生改变。化学污染可能会在生产过程或最终应用中的任何阶段发生，因此可能难以识别和缓解。保护 RH 传感器免受化学污染影响的理想途径是防止这种情况发生。本节介绍化学污染如何影响 RH 传感器、应对这种情况的常见步骤以及污染发生后如何处理。

### 4.6.1 化学污染如何影响 RH 精度

RH 传感器对化学污染的响应取决于几个关键因素：

- 所涉及的化学品类型
- 暴露的持续时间和频率
- 污染物/化学品的浓度
- 使用的是哪一种 RH 传感器

化学品类型可能会影响观察到的是正还是负 RH 偏移和/或增益。根据上述因素，误差的幅度和性质将发生变化，并且可能可逆，也可能不可逆。[HDC3x 器件用户指南第 2.2 节](#)提供了需要避免的化学品非详尽列表。

例如，长时间暴露于粉红色防静电泡沫将会导致 HDC302x 系列出现正 RH 偏移，因而使 RH 精度不再符合规格。如果污染本质上为离子性，RH 将出现较大的负增益，这可能开始出现在较低的 RH 水平（通常在 30%RH 左右）下，但不会在低于该阈值时显示任何误差。

污染物可以是气态、液态或固态。例如，气态污染物可能会填充聚合物的内部空隙，从而阻挡水蒸气分子并改变聚合物的相对介电常数 ( $\epsilon$ )。由于传感器的输出基于与  $\epsilon$  相关的电容变化，污染可能会导致 RH 读数不准确。

固态化学污染物沉积在检测聚合物的顶部。这可能会妨碍检测聚合物捕获水蒸气分子，还会影响聚合物的相对介电常数。

图 4-9 展示了三种化学污染场景，有助于直观地呈现污染物对 RH 检测聚合物的影响。左图显示无化学污染。中图显示了气态污染。右图显示了固体污染。

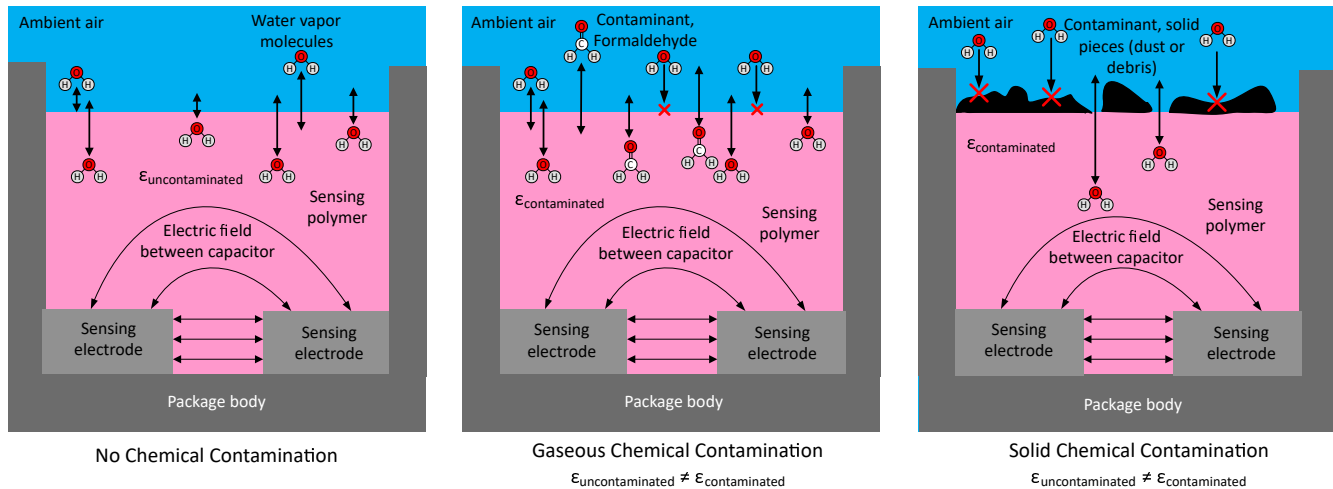


图 4-9. 有/无化学污染时的检测聚合物

#### 4.6.2 化学污染物在何处以及如何引入？

为了确定化学污染的潜在来源，需要对生产、测试和运行生命周期中的每个步骤进行全面审查。

在询问化学污染物可能进入 RH 传感器的位置和方式时，请提出以下问题：

- **组装和焊接：**
  - 免清洗焊膏/助焊剂是否为低残留物且不含挥发性溶剂？
  - 是否在传感器附近使用了助焊剂去除剂或电路板清洁剂？
  - 是否采用了保形涂层而未遮蔽传感器腔体？
  - 与第三方组装供应商密切协调，审查每个组装材料和工艺步骤，以了解是否意外接触化学品。
- **测试设置和再水合：**
  - 在测试或再水合过程中，传感器是否会暴露于房间中的挥发性化学品？
  - 测试环境中是否无空气传播的污染物？
- **储存和处理：**
  - 传感器是否存储在可能释放 VOC 的粉色泡沫或 LDPE 袋中？
  - 传感器是否靠近已知会释放污染物的材料（如乙氧基化胺或着色剂）？
- **运行条件：**
  - 传感器是否在清洁剂、工业溶剂或烟雾附近使用？
  - 在住宅应用中，它是否暴露于空气清新剂或家用化学品？
  - 在工业环境中，传感器是否在释放 VOC 的工序附近运行？

虽然生产过程中的污染通常可以得到控制，但现场暴露更难预防。烘烤、清洁和保护滤膜等缓解工具可能会有帮助，但并不能总是保证恢复。响应取决于污染物类型、暴露时间和聚合物灵敏度。

#### 4.6.3 减轻化学污染的影响：烘烤

进行烘烤是为了去除影响 RH 精度的水分或化学残留物。这种做法是有效的，因为在较高的温度下，化学污染物释放气体的速度会增加，这意味着化学污染物的去除过程得以加速。可以使用集成式加热器在芯片上完成烘烤（请参阅节 4.7.3 了解如何使用集成式加热器），也可以在外部的受控烘箱中进行。

首先将传感器在 100°C 和 <5%RH 的条件下烘烤 5 至 10 小时，然后重新评估 RH 精度。按照 TI 的 RH 传感器数据表中的建议，烘烤持续时间可长达 10 小时。烘烤后，根据数据表中的建议重新水合 RH 传感器，以帮助恢复或减少因化学品暴露而导致的精度漂移。如果在烘烤和再水合后未获得充分的 RH 精度改善，则执行额外的烘烤有



助于排出更多化学污染物。烘烤过程必须在没有他化学污染源的情况下进行，因为高温可能会加速进一步污染的影响。在有些（但并非所有）存在化学污染的情况下，烘烤可以减少由污染引起的 RH 变化。

#### 4.6.4 减轻化学污染的影响：清洗

清洁 RH 传感器是一个精细的过程，只能由经验丰富的人员执行。它仅在检测聚合物上出现可见固体或液体污染的情况下有效；清洁无法除去气体污染物，例如释放的 VOC。图 4-10 说明了如何使用拭子清洁检测聚合物的顶部。手动清洁会带来损坏 RH 传感器的风险，因此不应将其作为故障排除的第一步。

手动清洁传感器可以明显地清除沉积的化学污染物，但只能用于故障排除目的。如果对大量器件进行清洁，则传感器损坏的风险会显著增加。应当通过清洁来确定沉积的化学品是否会导致 RH 精度误差，以便在生产或最终应用环境中避免使用该化学品。

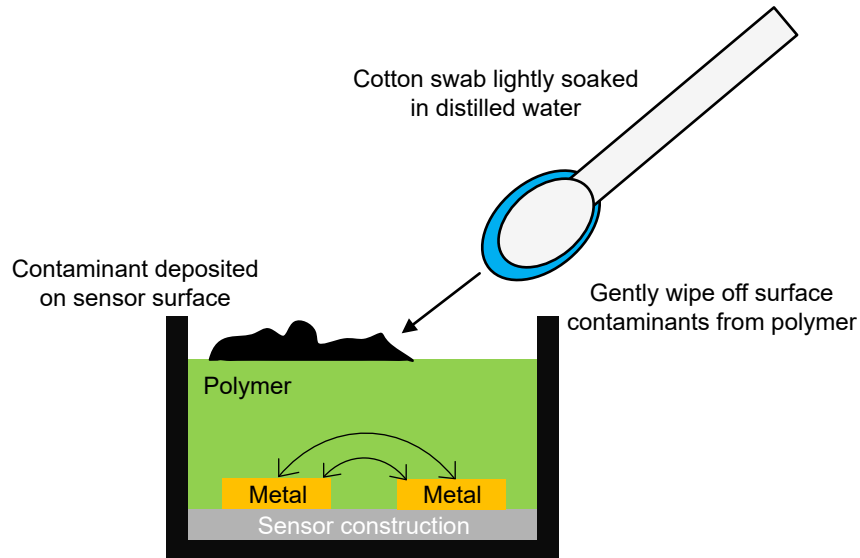


图 4-10. HDC 手动清洁示例

以下步骤介绍了安全清洁 RH 传感器检测腔的程序：

- 切勿使用化学清洁剂，例如 PCB 清洗剂或异丙醇。
- 用棉签蘸蒸馏水轻轻擦拭。棉签应湿润但不会滴水。
- 轻轻清洁 RH 传感器腔体内部。避免通过检测聚合物直接施压，尽可能轻轻擦拭。
- 确保腔内没有残留的水。
- 避免将水溅到传感器侧面，否则可能导致 PCB 上发生电气短路。
- 使用沿表面导流的低压压缩空气干燥传感器。
- 切勿使用超声波浴槽，因为浸没和振动可能会损坏传感器并导致器件下方进水，尤其是在未焊接散热焊盘的情况下。
- 使用显微镜观察检测聚合物，并观察是否去除了任何固体污染物。

#### 4.6.5 减轻化学污染的影响：外壳设计

外壳设计在保护 RH 传感器免受固体和液体污染物影响方面发挥着关键作用。将传感器放置在远离直接暴露的位置，例如使其偏离外壳开口，有助形成遮挡以免灰尘、污垢和液体侵入。在外壳开口处增加一个过滤器（例如，疏水性 PTFE 膜）可提供额外的保护。但是，外壳无法防止来自气体化学品的污染，因为传感器需要不受限制的气流才能准确跟踪环境湿度。

#### 4.6.6 减轻化学污染的影响：器件选择

TI 提供多代 RH 传感器 IC，增强了化学品暴露的保护功能。从第三代 HDC3x2x 系列开始，全新的聚合物技术可提高对化学污染以及 85°C/85% RH 等应力条件的耐受性。

- **HDC2021 和 HDC3021**：工厂预装了可去除的聚酰亚胺胶带，用于在制造步骤（例如 PCB 或保形涂层）中保护传感器元件。
- **HDC2022 和 HDC3022**：配备可靠的 IP67 级疏水性 PTFE 滤膜，可为传感器提供屏障，使其免受灰尘、水和 PCB 清洗液（通常包含 VOC）的影响。微孔 PTFE 膜对粒径低至 100nm 的颗粒的过滤效率达到 99.99%。

虽然带有 IP67 滤膜的器件可有效防止液体和微粒侵入，但它们不会阻挡气体污染物，因为环境空气仍必须接触检测元件。滤膜可能会略微延长 RH 响应时间，但为了延长传感器寿命并提高可靠性，这种折衷通常可以接受。

预防措施是最有效策略。在 RH 传感器的组装、存储和运行过程中，识别和缓解与化学污染物的所有潜在接触点至关重要。

#### 4.6.7 减轻化学污染的影响：组装注意事项

使用带有聚酰亚胺胶带盖的 RH 传感器时（无论是在出厂时贴附，还是按照节 4.2.3 中的说明手动贴附），胶带可临时阻挡组装污染物。务必确保在组装过程的最后一步安装 RH 传感器，以消除额外回流焊循环和化学品暴露的风险。

### 4.7 运行条件：应用环境条件和影响

即使部署 RH 传感器时未在制造或组装过程中产生任何误差，应用环境本身仍可能导致精度问题，无论是暂时性还是永久性。高湿度、极端温度或冷凝等环境应力因素可能会降低 RH 精度。通常可以使用集成式加热器或通过烘烤器件来减少由环境条件引起的暂时性 RH 误差。

#### 4.7.1 导致 RH 精度误差的环境条件

长时间暴露在高湿度下会导致暂时性 RH 误差，通常表现为正偏移和增益误差。相比之下，长时间暴露在低湿度和高温下会因脱水而导致暂时性的负 RH 偏移和增益误差。持续暴露在极端环境中（例如 85°C/85% RH 应力）将会导致永久性 RH 误差。在这种情况下，水分可能会在聚合物结构内凝结，从而改变其介电特性并降低其检测湿度变化的能力。

RH 传感器的等级适合用于非冷凝环境。如果传感器表面出现冷凝或水滴，RH 输出将暂时降至 0%，并且在除去水分之前一直不准确。烘烤或使用内部加热器将可通过蒸发传感器上的液态水来帮助恢复。

总结持续环境条件如何导致 RH 精度误差：

- 高 RH 暴露、无高温暴露 → 可逆的正 RH 偏移，以及由于过多的水蒸气填充检测聚合物空隙而可能产生的正 RH 增益漂移
- 低 RH 下的高温暴露 → 可逆的负 RH 偏移，以及由于检测聚合物脱水而可能出现的负 RH 增益偏移。
- 高温和高 RH 暴露（例如，85°C RH/85%RH）→ 不可逆的正 RH 偏移和正 RH 增益偏移，这是因为检测聚合物空隙中形成的水滴会将高 RH 条件锁定在传感器内。
- 检测腔体正上方冷凝 → 传感器输出暂时降至 0%RH，然后在液态水继续阻挡环境水蒸气进入检测聚合物时将无法准确地检测 RH。

#### 4.7.2 RH 偏移缓解和系统级设计

对于长时间暴露于高湿度以及冷凝预防/去除引起的正 RH 偏移，烘烤可有效消除 RH 偏移。但是，这通常需要从系统中取出传感器，对于现场应用来说不切实际。集成式加热器提供了一种替代的系统内方法。然而，预防是最好的方法，尤其是在加热或烘烤不合适的环境下。另一种策略是优化外壳设计，以最大限度地减少暴露于潮湿和污染的情况。设计外壳时，RH 传感器不会直接位于任何开口下方，因而降低了水滴进入腔体的风险。使用配有 IP67 级滤膜的传感器（例如 HDC2022 或 HDC3022），以防止进水和颗粒物污染。

要从长时间暴露于低湿度和高温环境引起的 RH 负偏移中恢复，请按照数据表中的建议重新水合传感器。HDC2x 和 HDC302x 系列等一些 RH 传感器具有可编程的 RH 偏移寄存器，因此如果无法消除 RH 偏移，则可以在传感器中对其进行数字校正。

#### 4.7.3 使用集成式加热器

可以使用集成式加热器定期去除吸收的多余水分，而不必从系统中拆卸 RH 传感器进行外部烘烤。加热器可用于在高湿度环境中恢复 RH 精度，并防止/消除检测表面上的冷凝。典型的程序涉及以 3V 或更高的电压为传感器供电，以最大功率激活加热器几分钟，然后测量 RH 精度。在最大功率下使用加热器，将可在给定电源电压下实现最大的温升。用户应力求使用加热器达到 100°C。为了使用加热器进行 RH 精度校正，请按照以下过程操作：



1. 通过功率设置激活加热器，以使 RH 传感器达到 100°C (通常是 3.3V VDD 的最大功率)。
2. 在最终温度下运行加热器至少 1 分钟、最多 5 分钟 (或在加热器测试期间监测 RH 读数，确保 RH 读数降至 2%-3%RH 以下)。
3. 停用加热器，等待至少 1-5 分钟进行冷却 (确保温度读数恢复到先前的环境读数)。
4. 重新测量 RH 并评估 RH 精度，根据需要重复步骤 1-4。
5. 定期重复步骤 1-4，防止 RH 精度偏离规格限值。加热器环路频率将取决于导致 RH 精度问题的环境条件，加热器效率和功率等级，需要用户进行实验。

加热器性能应在实验室设置中进行表征，该设置应严密复制应用条件以确定最佳设置。PCB 设计会影响加热器效率。将散热焊盘焊接在传感器下方可能会将热量散发到电路板中，减少聚合物表面可获得的热量。为了改善加热，请考虑尽量减少传感器下方的覆铜、使用薄 PCB (< 32 mil) 或柔性 PCB、引入槽切口并使散热焊盘保持未焊接状态。

使用加热器确实需要权衡取舍。在加热器激活期间及之后不久，由于温度快速上升，RH 读数将不准确，导致 RH 读数下降到 0%RH。此外，加热器消耗的电流要大得多。例如，HDC3020 在全功率加热期间可以在 3.3V 下消耗高达 112mA 电流。在电池供电系统中，这可能会限制使用。设计人员必须平衡加热器使用频率与系统功率限制，尤其是在持续潮湿的环境中。加热器也无法帮助消除负 RH 偏移，因为导致这些误差的原因是高温暴露。

## 4.8 RH 精度调试流程图

为了帮助确定 RH 精度问题的来源，可以使用图 4-11 中所示的流程图。该图引导用户完成基于观察到的误差类型（正偏移、负偏移或增益误差）的结构化评估。

在使用流程图之前，请确保通过在各种湿度水平下进行测试来表征 RH 误差。如果误差未明显归属于单个类别，请使用此流程图作为了解潜在原因和制定纠正措施的指南。

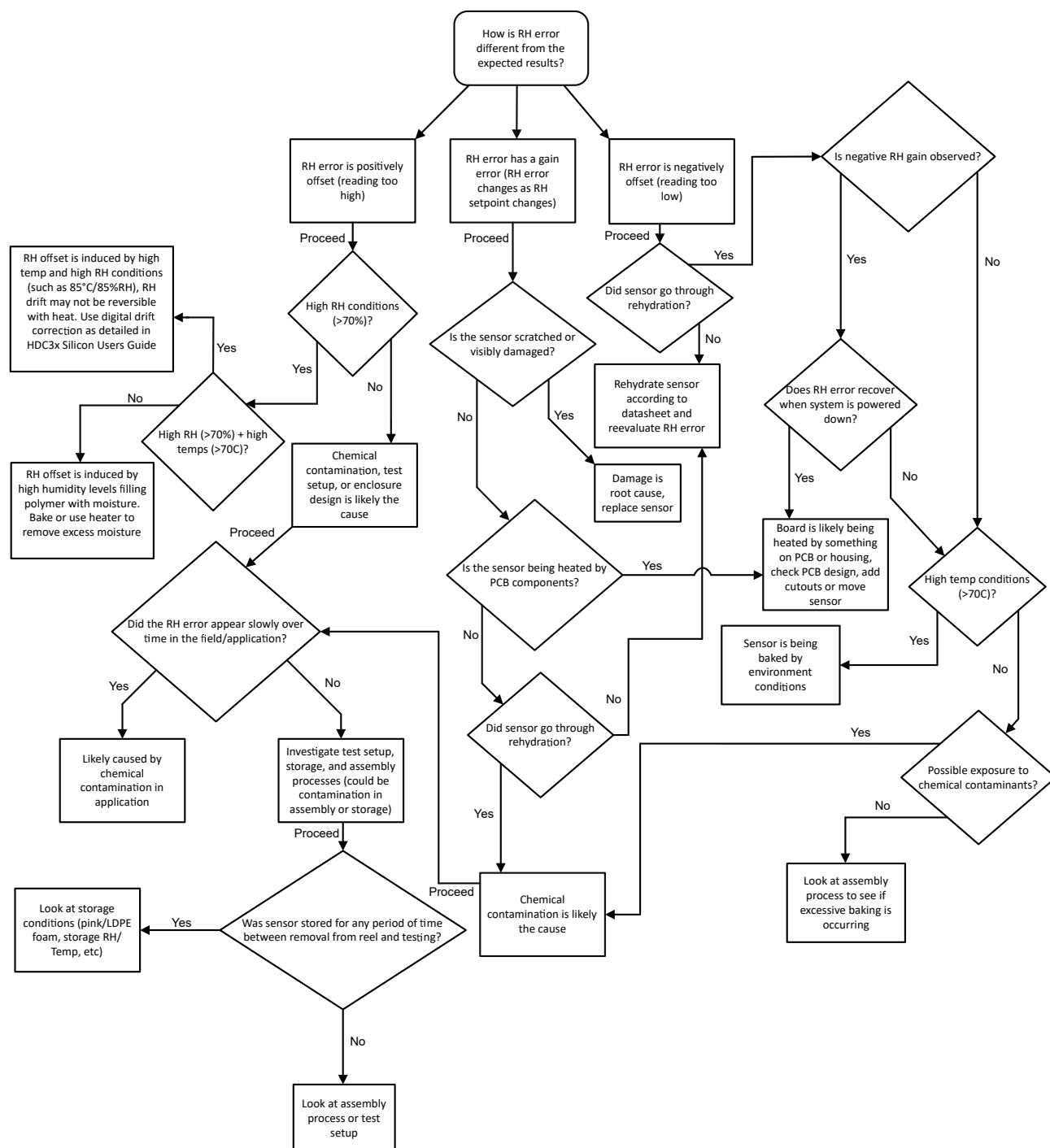


图 4-11. RH 精度调试流程图

## 5 总结：设计和调试 RH 精度

在整个生产和部署过程中，RH 传感器精度可能会受到多种污染源影响。本文档概述了在组装、处理和系统集成过程中消除或缓解误差源的策略。无论是诊断现有问题还是设计新应用，遵循系统流程都可以提高 RH 检测的可靠性和精度。

回顾图 1-1 和[#unique\\_14/unique\\_14\\_Connect\\_42\\_GUID-843E0264-5CDC-41F2-A8A4-5730FA2D0652](#)，设计时间表说明了有多少个可能的向量会产生 RH 精度误差。在开始设计过程时将考虑到这一点，使用户能够消除他们可以控制的领域中的风险。RH 精度之所以重要，是因为用户需要他们的 RH 传感器在现场的寿命尽可能长，并为终端用户提供正确的结果。因此，用户必须使用 RH 传感器进行设计，以了解 RH 误差源并在出现 RH 精度问题之前尽可能消除这些误差源。

**表 5-1. RH 误差源及其防止/缓解方法汇总**

| RH 精度误差源   | RH 误差的原因是什么？                                                    | 如何缓解和防止 RH 误差                                                                  |
|------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| PCB 和外壳设计  | PCB 和/或外壳设计导致 RH 传感器无法准确地检测环境温度和湿度。                             | 使用可优化环境空气检测的 PCB 布局技术以及不会限制气流的外壳。                                              |
| 焊接和组装      | 不推荐的回流焊曲线和组装材料导致化学品污染或损坏。                                       | 遵循建议的回流焊曲线，使用无 VOC 和其他潜在污染物的组装材料。                                              |
| 再水合        | 跳过或偏离数据表再水合曲线。                                                  | 按照数据表中的再水合说明操作。                                                                |
| 测试         | 在没有经校准基准的情况下测试 RH 传感器、温度和湿度稳定时间不足、在不受控制的环境中进行测试，以及未考虑热梯度等测试室误差。 | 按照制造商关于稳定时间和温度梯度补偿的建议，在 RH 室内利用经校准基准测试 RH 传感器。                                 |
| 储存和处理      | 处理、在极端湿度条件下存储期间或有释气的化学污染物存在的情况下损坏或污染 RH 传感器。                    | 使用真空笔处理 RH 传感器，并将 RH 传感器存储在低温、低湿度条件的金属化 ESD 袋中，使其远离直接光线暴露。                     |
| 化学污染       | RH 传感器的检测聚合物的介电特性会因不必要的化学物质而改变。                                 | 通过检查生产过程并查看不同材料的 MSDS 以寻找可能存在问题的化学品，确定化学品污染的潜在来源。使用集成式加热器或用外部烘箱进行烧烤，减轻现有的化学污染。 |
| 应用环境中的运行条件 | 在极端湿度条件下持续运行。                                                   | 定期使用集成式加热器烘烤，以消除随着时间推移在检测聚合物中累积的多余水蒸气，防止 RH 误差变得过大。                            |

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [HDC302x 0.5%RH 数字相对湿度传感器和 0.19%RH/年长期漂移、4s 响应、低功耗、偏移误差校正、0.1°C 温度传感器](#), 数据表。
- 德州仪器 (TI), [HDC2080 低功耗湿度和温度数字传感器](#), 数据表。
- 德州仪器 (TI), [HDC2021 带组装保护套的高精度低功耗湿度和温度传感器](#), 数据表。
- 德州仪器 (TI), [HDC2022 带 IP67 级防水防尘保护套的高精度低功耗湿度和温度传感器](#), 数据表。
- 德州仪器 (TI), [HDC2010 低功耗湿度和温度数字传感器](#), 数据表。
- 德州仪器 (TI), [HDC302x 器件用户指南](#), 用户指南。
- 德州仪器 (TI), [HDC20XX 器件用户指南](#), 用户指南。
- 德州仪器 (TI), [湿度传感器：存储和处理指南](#)
- 德州仪器 (TI), [85°C/85% RH 加速寿命测试对湿度的影响](#), 白皮书。
- 德州仪器 (TI), [优化湿度传感器的布局和布线](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [TI 湿度传感器：编程和集成指南](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [湿度传感器比较指南](#), 产品概述。
- 德州仪器 (TI), [使用相对湿度推导蒸气压、露点、绝对湿度和焓值](#), 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [故障品处理指南](#), 具体指南。
- 德州仪器 (TI), [MSL 等级和回流焊曲线](#), 应用报告。

## 7 附录

如节 1.3 中所述，本节包含每个案例研究的详细概述。每个案例研究都包括客户遇到的 RH 精度问题的说明（书面和图形两种形式）、TI 和客户采取的调查步骤、最终的根本原因以及所采取的缓解和预防措施。

### 7.1 案例研究 1：湿度引起的 RH 正偏移

#### 问题说明

客户在 PCB 上部署了 HDC3020，并在组装后评估期间观察到器件子集与基准相比存在正 RH 偏移。两个受影响的器件在从电路板上拆焊后，已退回 TI 进行分析。

#### 调查阶段

初始步骤是在受控 RH 室中的各种湿度水平下测试退回的器件。与已知良好的控制单元相比，返回的器件显示出一致的 RH 偏移，但没有增益误差。由于误差仅限于偏移，因此调查重点关注暂时性吸湿性，而非化学污染。这种 RH 偏移如图 7-1 所示。

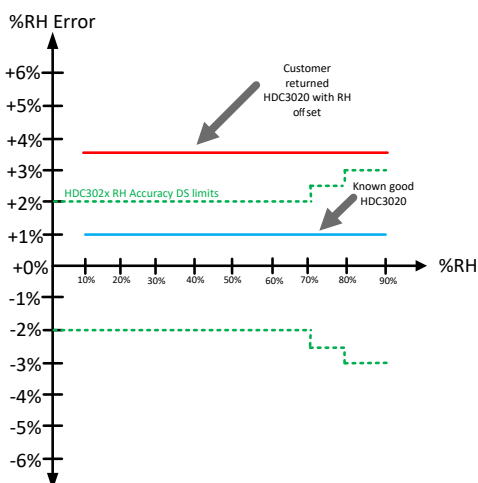


图 7-1. 存在 RH 偏移的 HDC3020 与已知良好的 HDC3020

由于只是 RH 偏移而非 RH 增益，因此调查重点关注过度吸湿作为潜在原因，而非化学污染。为了缓解疑似由湿度引起的误差，在 100°C 下将传感器烘烤 2 小时并重新测试。烘烤成功恢复了 RH 精度。如果这种方法失败，则考虑在 100°C 下进行 10 小时二次烘烤。如果偏移仍然存在，则表明由于环境应力或可能的化学污染而造成永久性损坏。

烘烤 HDC3020 后，传感器能够消除 RH 偏移。客户退回的 RH 传感器的 RH 精度提高，如图 7-2 所示。

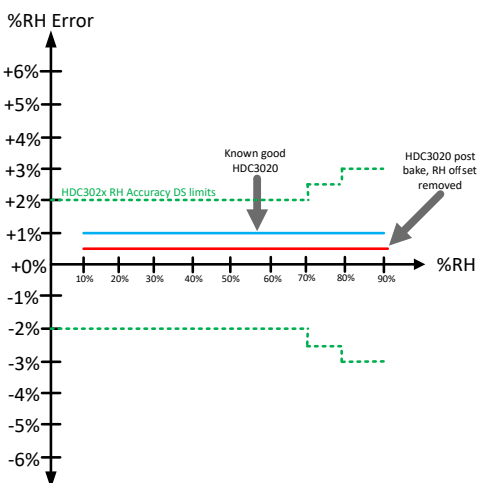


图 7-2. 存在 RH 偏移的 HDC3020 烧烤后

为了找出根本原因，用户需要找到表现出这种偏移的 HDC3020 与无偏移的器件之间的差异化信息或采取的步骤。排除批次差异或应用差异后，用户发现所有正偏移的传感器都由一家特定制造商组装。该 PCBA 制造商可能在组装或存储期间持续将 HDC3020 暴露于高 RH 条件 (>70%)，因而导致了正 RH 偏移。

## 结论

- RH 误差极可能由高湿度组装条件下的暂时吸湿引起。
- 在 100°C 下烘烤 2 小时可有效消除偏移。
- 所有受影响的器件均追溯到一家制造商，突出了在传感器组装过程中控制湿度的重要性。
- 预防措施包括实施低 RH 存储或在组装过程中避免高湿度暴露。



## 7.2 案例研究 2：100%RH 环境下的渐变 RH 精度漂移

### 问题说明

HDC3022 部署在三种室外环境中：城市、沿海和山区。所有器件最初都满足 RH 精度规格。然而，在两到三个月内，器件的 RH 精度下降，无法在高湿度条件下达到完全 100% RH。例如，尽管环境湿度达到 100%，但有一个传感器仍保持 90% RH，如图 7-3 所示。

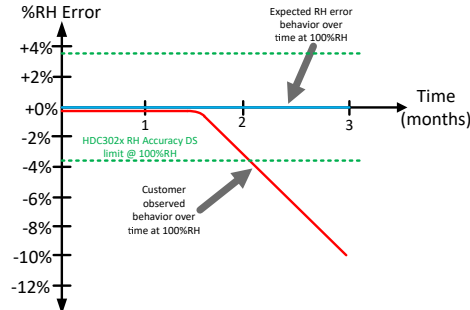


图 7-3. 100% RH 下降时的 HDC3022 RH 误差随时间推移的变化

### 调查阶段

由于器件部署之前在规格范围内运行，因此排除了 PCB 布局、组装或再水合等早期原因。虽然环境暴露在三个位置各不相同，但症状一致，表明存在共同的根本原因。

尽管长时间暴露在 100% RH 下通常会导致正 RH 偏移，但这些传感器表现出相反的情况：最大 RH 读数降低。这表明存在障碍物，而非聚合物饱和。将器件在 70°C 和 10% RH 条件下烘烤 6 小时可恢复 RH 精度，确认这是可恢复的误差。

确定可能的原因是 PTFE 滤膜上灰尘堆积，因而限制湿气进入。这个假设在消除过程中形成，因为初始部署期间 RH 准确，并且不同的应用环境导致很难识别常见的暴露化学品，因此化学污染不太可能发生。烘烤后的改善表明，堆积的灰尘被部分清除，使检测聚合物能够再水合。

图 7-4 显示了根本原因识别过程，在 RH 精度调试流程图中进行了演示：

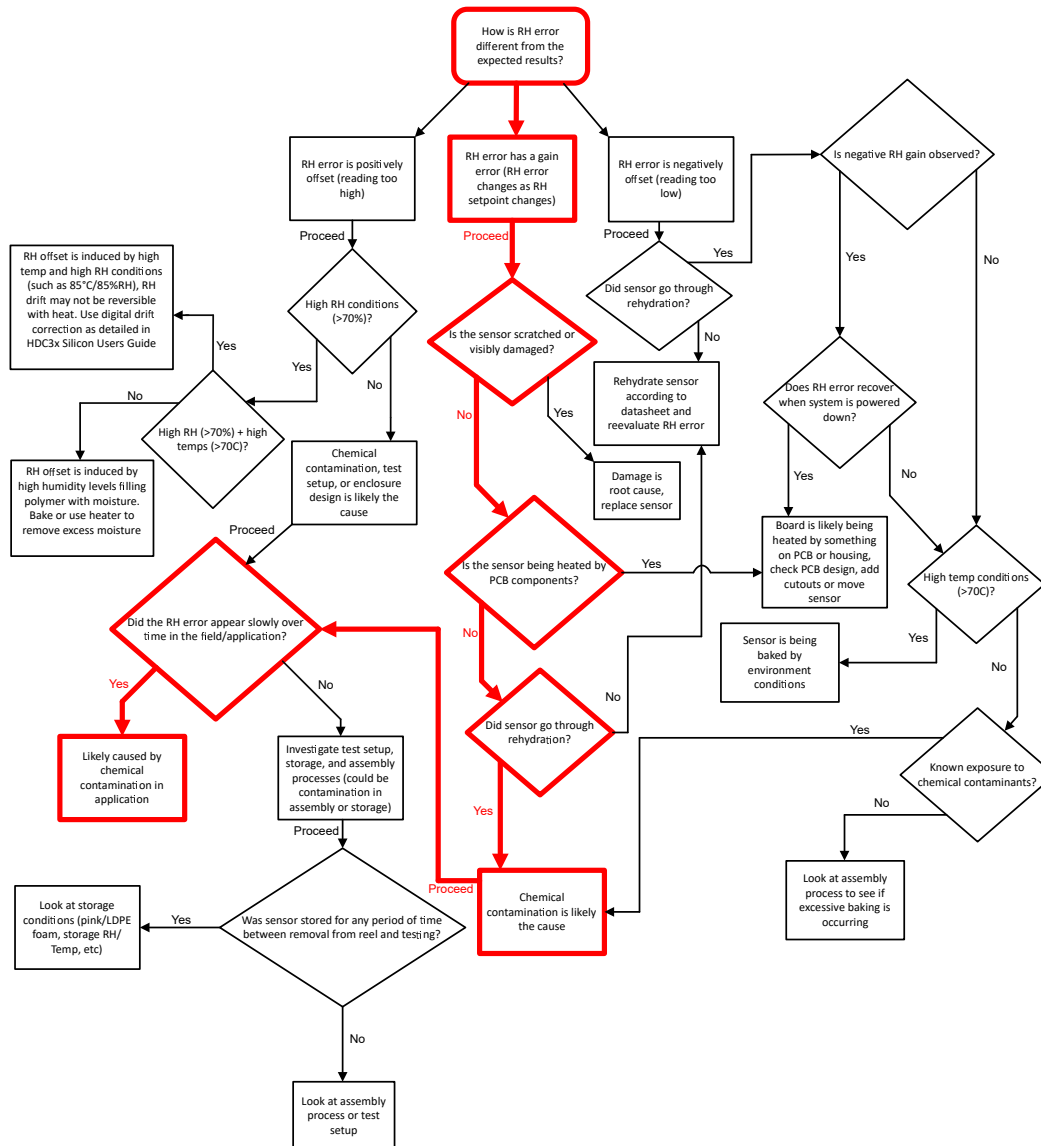


图 7-4. RH 精度调试流程图案例研究 2 示例

## 结论

- 低温烘烤步骤通过清除障碍物改善了性能。
- 该问题与 VOC 或组装质量引起的化学污染无关。
- 外壳设计改进可以通过调整进气方向来减少未来的灰尘侵入，使灰尘无法到达 HDC3022。
- 由于实践中现场器件无法放入烘箱处理，建议定期使用集成式加热器。

### 7.3 案例研究 3：组装和热效应综合因素

最后一个案例研究涉及多个重叠因素，每个因素对 RH 精度偏差的影响各不相同。需要进行系统的多阶段调查，以隔离和评估发热、污染和系统设计对观察到的传感器行为的影响。

#### 问题说明

客户在气体检测应用中部署了 HDC2021 和 HDC3021 器件，其中 RH 传感器用于补偿气体传感器测量。RH 和气体传感器安装在外壳内，外壳上有一个通风孔，用于接触环境空气。

在测试期间，HDC2021 器件看上去在规格范围内运行，而所有 HDC3021 器件始终表现出 RH 负误差。HDC3021 全系列都受到影响。客户将样品模块退回 TI 进行故障分析。

#### 调查阶段 1：测试复制和初始结果

在 TI，客户模块被置于含有静止空气的测试室中，并根据冷镜基准测量温度和 RH。如图 7-5 所示，HDC2021 显示了平坦的 RH 误差曲线，而 HDC3021 显示了负 RH 增益误差。这证实了客户的观察。

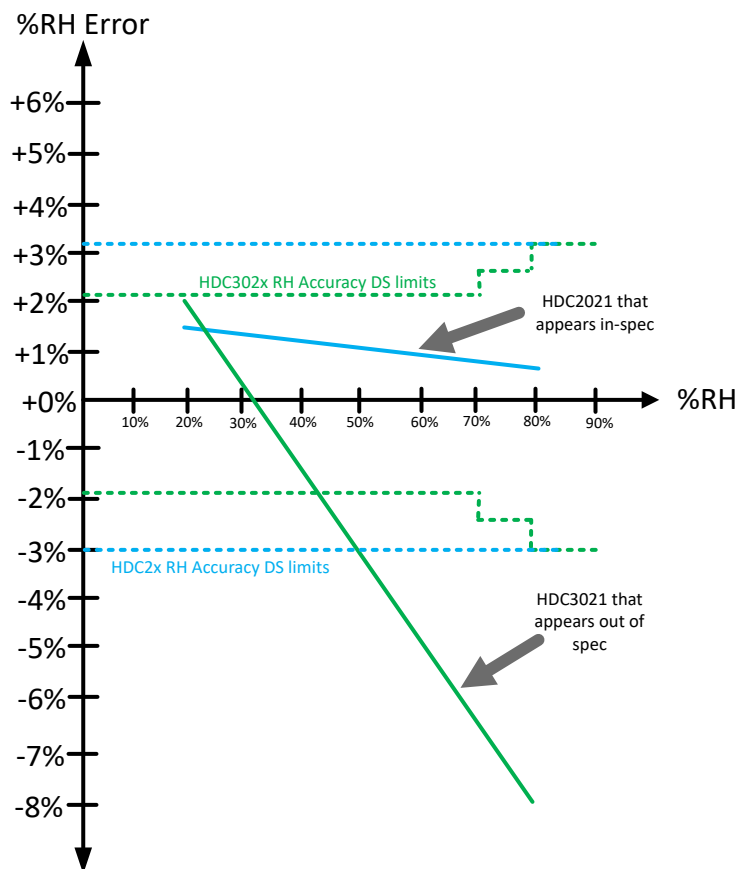


图 7-5. 在静止空气中测试的用户电路板和外壳上的 HDC2021 和 HDC3021

对测试数据的进一步分析表明，两种 RH 传感器报告的内部温度大约比基准高 2°C。这种差异表示局部加热。由于 RH 与温度相关，因此根据露点关系，传感器温度的升高会导致报告的 RH 降低。表 7-1 总结了加热的影响，表明 2°C 温升可能会产生大约：

- -2% 的 RH 误差 (20% RH 环境条件下)
- -9% 的 RH 误差 (80% RH 环境条件下)

表 7-1. 不同环境条件下的露点计算值

| 环境 RH (%) | 环境温度 (°C) | 露点 (°C) |
|-----------|-----------|---------|
| 20        | 25        | 0.48    |
| 80        | 25        | 21.31   |

表 7-2. 2°C 加热引起的 RH 差值

| 露点 (°C) | 加热温度 (°C) | 加热 RH (%) | RH 差值 (%) |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 0.48    | 27        | 17.77     | -2.23     |
| 21.31   | 27        | 71.07     | -8.93     |

这说明了 HDC3021 在负 RH 偏移和增益误差方面存在明显差异。但是，由于两个传感器都会出现发热情况，因此 HDC2021 的“符合规格”结果会产生误导。其真正的 RH 精度包括正 RH 偏移和增益误差，该误差被发热引起的负偏移所掩盖。

## 调查阶段 2：发热隔离和重新评估

为了隔离发热效应，TI 从客户模块中拆下了 RH 传感器并将其安装在 TI 测试板上。在受控环境测试室中，使用风扇循环潮湿空气，以确保整个测试室温度均匀。在这种热优化型环境中，两个传感器都显示了真正的正 RH 偏移和增益误差。HDC3021 的误差比 HDC2021 小，但仍超出规格，如图 7-6 所示。

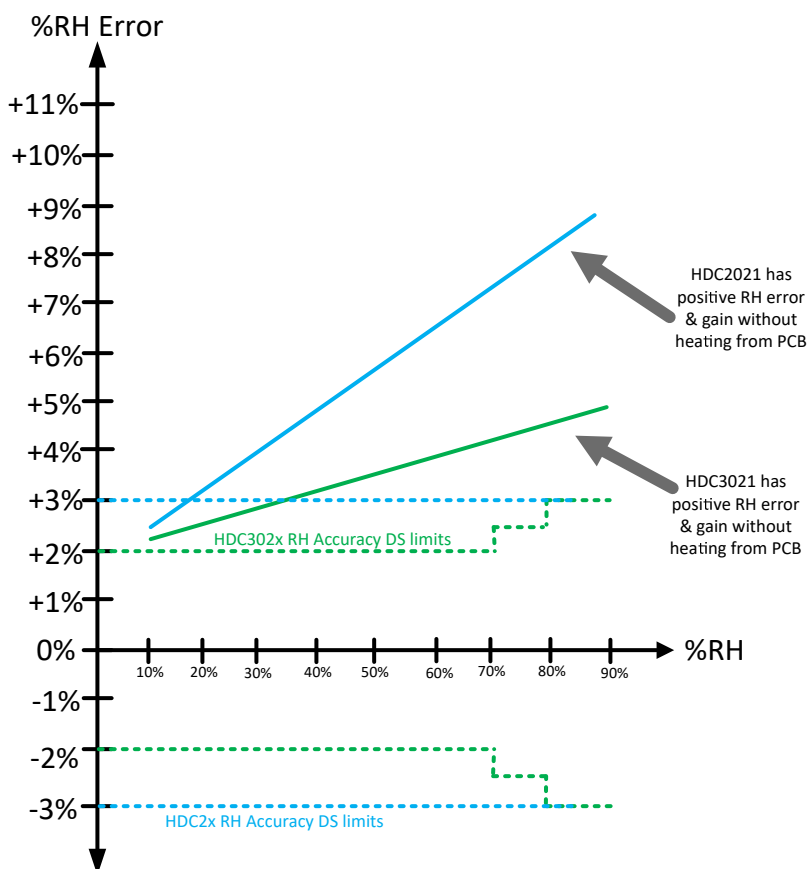


图 7-6. HDC2021 和 HDC3021 在非用户电路板上进行了测试，无 PCB 发热，流动空气

## 调查阶段 3：故障分析和污染检测

为了确定任何污染或可能的传感器损坏，TI 对客户退回的器件进行了故障分析。对以下两种传感器类型都进行了故障分析：

- **HDC2021**：光学和 SEM 检查显示聚合物腔内存在可见污染。EDX 分析检测到 Cl、S、Sn、Ca 和 Al 的异常水平 — 表明存在外部化学暴露。

- **HDC3021** : SEM 成像显示整个表面的圆点图案，暗示胶带盖下方存在污染。保护膜在组装过程中可能会翘起，可能造成暴露。

使用已知良好的器件替换 **HDC3021**，以进行 ABA 交换。在受控气流（静止空气与风扇接通）下进行测试时，新装置恢复到规格内的性能，确认先前的测量值同时受到内部发热和传感器损坏的影响，如图 7-7 所示。

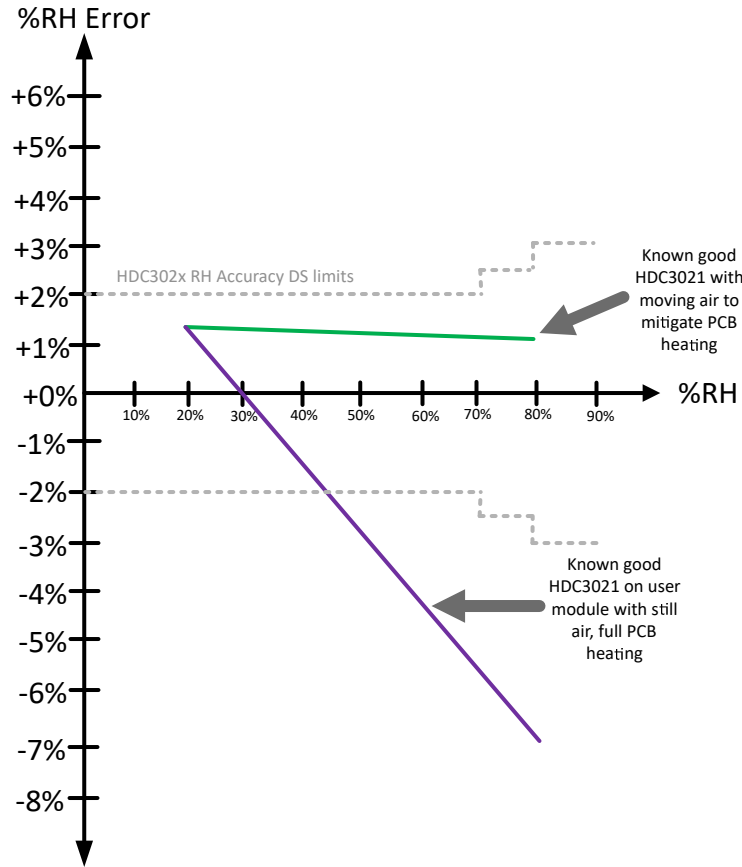


图 7-7. 使用流动空气和静止空气在用户电路板上测试了已知良好的 **HDC3021**

#### 调查阶段 4：根本原因回溯和材料审核

隔离发热效应后，这两种传感器都表现出与化学污染一致的正 RH 增益误差。考虑到该问题影响传感器全系列的问题，根源可追溯到制造或存储过程中的系统性问题。

客户提供了所有的全部材料的文档和 MSDS 表。TI 发现免清洗焊膏中存在聚乙二醇醚。已知该溶剂与乙二醇类似，会导致 RH 传感器偏移和增益误差。[HDC302x 器件用户指南](#)明确建议避免接触乙二醇基溶剂。乙二醇基溶剂会由于分子的极性而导致 RH 误差，这会改变检测聚合物的相对介电常数，如图 7-8 所示

一种更安全的替代方案是推荐的焊膏 Kester R276，它不含已知的挥发性污染物。

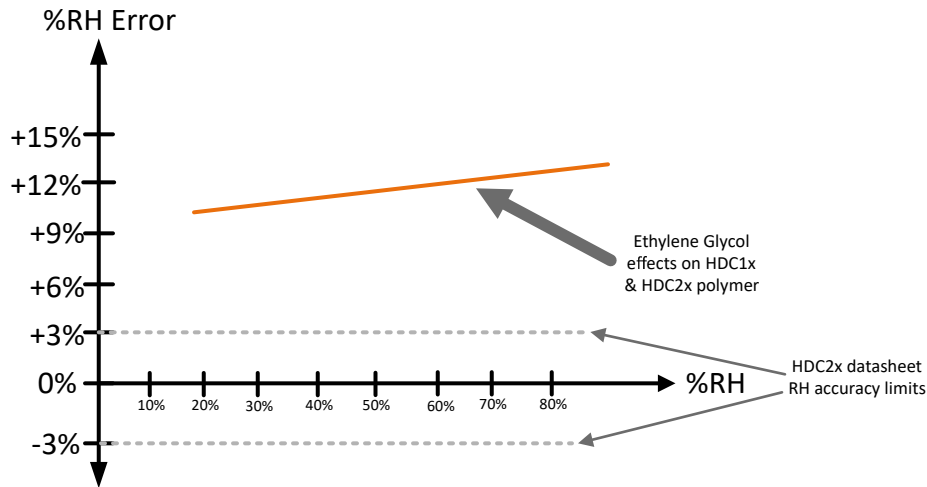


图 7-8. 乙二醇对 HDC10XX 和 HDC20XX 检测聚合物的影响

## 结论

在此示例中，确定了三个不同的误差源：

1. PCB/外壳发热 -> 负 RH 误差
2. 化学污染 -> 正 RH 偏移/增益
3. 测试设置不匹配 -> 掩盖真实性能

根本原因和缓解措施如下：

- HDC2021 明显符合规格的行为由相反的误差矢量（发热和污染相互抵消）造成。
- 用户必须确保 PCB 布局 and 外壳设计能够更大限度地减少局部发热，以使 RH 传感器测量真实的环境条件。
- RH 测试设置必须使用放置在传感器附近和外壳内部的参考探头，以反映相同的本地环境。PCB 发热改变了传感器周围的条件，因此在本地环境之外使用探头进行测试会产生误导性的 RH 精度结果。
- 污染预防至关重要：避免使用焊膏或含有挥发性乙二醇或溶剂的材料。TI 建议免清洗焊膏和助焊剂，并且在组装后不要清洁 PCB。始终查阅 MSDS 文档以确保兼容性。即使是免清洗焊膏也会产生挥发性化学污染物。
- 在热敏感型应用（例如，与气体传感器共同封装）中，测量补偿算法必须考虑局部发热效应。PCB 和外壳的设计必须使 RH 传感器的结温与环境温度相匹配，以获得出色的精度。



## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月