

Application Note

使用集成式加热器从高湿暴露中恢复 RH 精度



Alex Thompson, Sakeenah Khan

摘要

在长时间暴露于高湿环境后，基于聚合物的相对湿度传感器会出现可恢复的 RH 误差偏移。这种相对于时间零点 RH 的误差偏移称为 RH 漂移。对于无法依赖正常室内条件下被动恢复或离线烘箱烘干的系统，集成式加热器提供了一种实用的系统内方法，可加速去除传感元件中的水分并降低 RH 偏移。本应用手册介绍了两个设计案例：孤立高湿事件后的单次恢复，以及持续高湿运行期间的周期性缓解。在本文评估的 62mil 刚性 FR4 HDC3020 电路板上（已焊接散热焊盘），采用 3.3V 电压、每分钟 1 秒的全功率加热，在所测试的连续运行方案中实现了最佳平衡，最终 RH 漂移保持在约 +0.18%RH。减小 PCB 热质量、增大环境热阻以及提高加热器功率，均可提升加热器的有效性。但加热器性能的提升必须与功耗进行权衡。

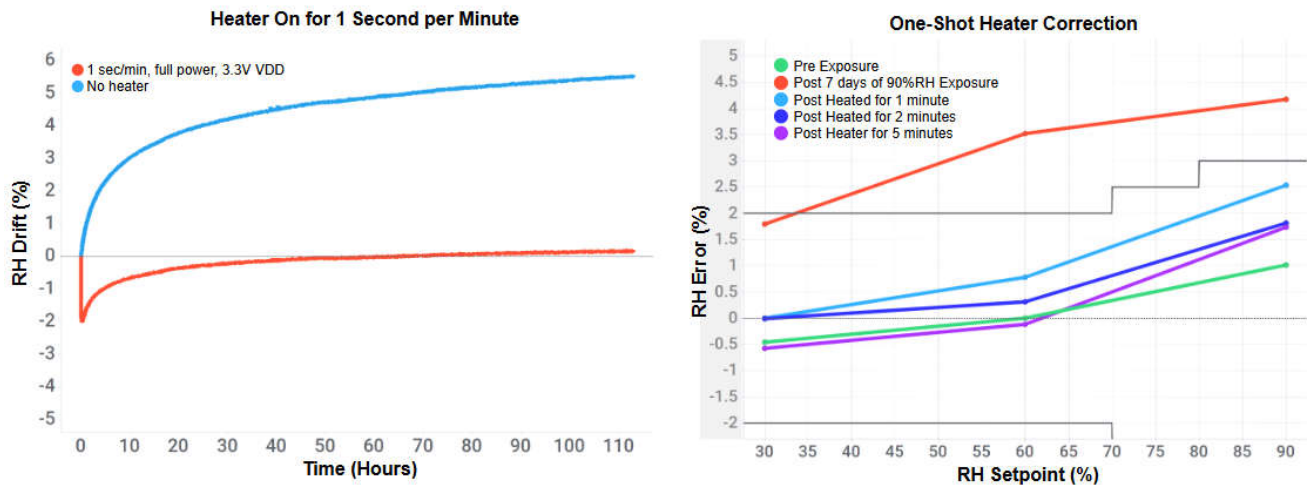


图 1-1. 连续与单次 RH 漂移缓解

1 简介

图 1-1 展示了电容式 RH 传感器的工作原理。电容式 RH 传感器采用一种聚合物，其介电特性会随聚合物吸收和释放水汽而变化。当 RH 传感器暴露于高湿条件 (> 80%RH) 时，传感聚合物可能会被水汽饱和。当环境 RH 保持非常高时，聚合物无法依靠扩散来排出多余水汽。这是因为在室温下，水汽被聚合物吸收的速率超过了扩散速率（即水汽分子离开聚合物的速率）。因此，随着高湿暴露时长的增加，RH 漂移的正向偏移将变得越来越大。

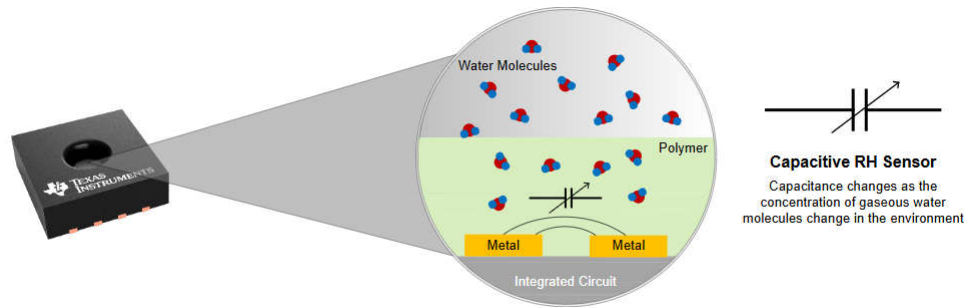


图 1-1. 电容式 RH 传感器如何利用聚合物捕获水汽

RH 漂移与 RH 精度不是同一个概念。例如，如果在给定湿度水平下 RH 精度的最小和最大限值为 $\pm 2\%RH$ ，这并不会计入 RH 漂移。如果 RH 传感器在 80%RH 环境中的读数为 81%RH，则已满足 RH 精度要求。当高湿环境开始使多余水汽进入传感器，且 RH 误差从 81%RH 增大到 83%RH 时，RH 传感器便会产生 +2%RH 的漂移。

图 1-2 展示了一个简化的 RH 漂移示例。蓝色和红色曲线均显示了夸张的 RH 磁滞“上下”波动曲线，以清楚表明 RH 漂移是与 RH 磁滞不同的现象。红色曲线组与蓝色曲线组所用的是同一个 RH 传感器，区别在于红色曲线是传感器经高湿暴露产生 RH 漂移之后的表现。左侧箭头显示了 RH 传感器在该环境条件下的向上偏移情况。随后指向下方的右侧箭头表明，通过高温暴露（无论是通过烘烤还是使用 TI RH 传感器内部的集成式加热器）可以缓解并消除 RH 漂移。集成式加热器为用户提供了一种在应用使用期间烘出多余水汽的方法。

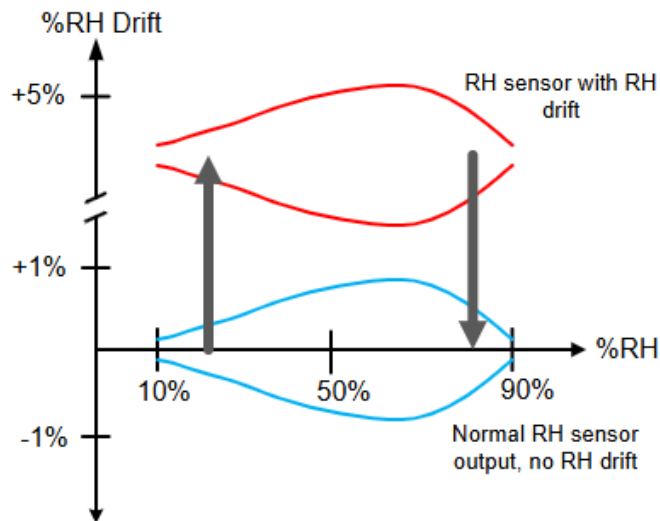


图 1-2. RH 漂移示例

2 集成式加热器运行与设计调节因素

TI 产品系列中的每个湿度传感器都集成有加热器。HDC1x、HDC2x 和 HDC302x 是数字式 RH 传感器，其加热器可通过编程开启，而 HDC3120 是模拟 RH 传感器，其加热器通过外部引脚启用/禁用。HDC302x 具有多种可供用户配置的加热器功率水平。加热器是芯片内的一个电阻元件，通过 V_{DD} 线路汲取相对较大的电流来产生热量。这会升高 RH 传感器的结温并加热传感聚合物，使捕获的多余水汽蒸发回空气中。在加热器运行期间，可继续读取温度和 RH，因此用户可以观察传感器的升温情况。HDC302x 加热器配置会改变加热器的电阻，从而实现不同的加热器功率水平。

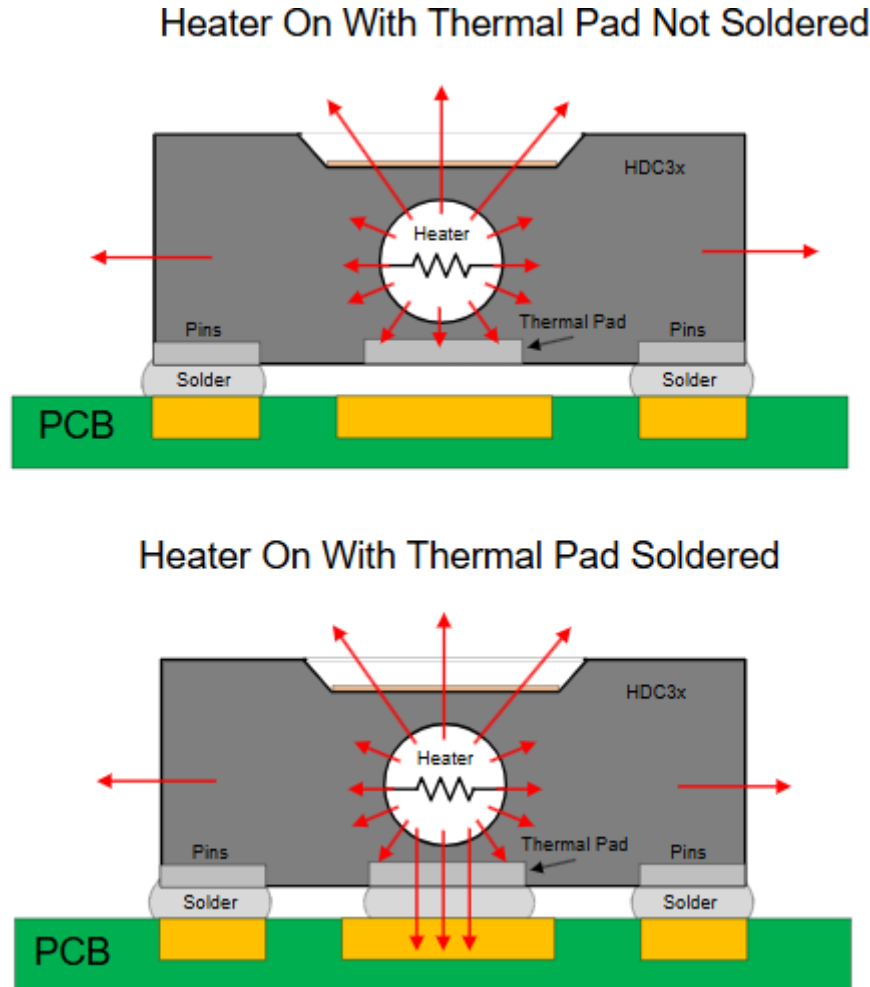


图 2-1. 焊接散热焊盘对加热器的影响

在实际中，加热器有效性主要受三个变量影响：热路径、加热器能量和激活方案。热路径决定了有多少电加热器功率转化为有效的结温升高，而不是散逸到 PCB 中。这可以通过 PCB 的环境热阻和热质量来理解。

表 2-1 展示了在焊接和不焊接散热焊盘时 $R_{\theta JA}$ 的差异。该表取自 HDC3120 数据表的“热特性”部分，该器件具有与 HDC302x 相同的封装和加热器，但在 3.3V V_{DD} 下具有固定的 62mW 加热器功率水平。不焊接散热焊盘时， $R_{\theta JA}$ 几乎翻倍。然而，设计更高的 $R_{\theta JA}$ 也会略微增加传感器的温度和 RH 响应时间。这是因为此时对环境温度和 RH 变化的阻碍更大。因此，传感器对这些环境变化的响应会更慢。如果快速响应时间对应用至关重要，那么对于某些用户来说，不焊接散热焊盘的缺点可能大于优点。

表 2-1. HDC3120 热性能信息

热指标		HDC3120 DEF (WSON) 8 引脚				单位
		散热焊盘已焊接		散热焊盘未焊接		
		加热器关闭	加热器开启	加热器关闭	加热器开启	
$R_{\theta JA}$	结至环境热阻	89.3	95.0	170.5	176.3	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	结至外壳 (顶部) 热阻	58.0	62.0	82.9	122.7	°C/W
$R_{\theta JB}$	结至电路板热阻	58.0	85.0	117.7	86.5	°C/W
Ψ_{JT}	结至顶部特征参数	12.4	15.7	21.5	25.2	°C/W
Ψ_{JB}	结至电路板特征参数	57.6	61.9	117.5	121.5	°C/W
$R_{\theta JC(bot)}$	结至外壳 (底部) 热阻	37.9	42.0	-	42.0	°C/W
M_T	热质量	5.7	5.7	5.7	5.7	mJ/°C

为提高加热器温升，用户应着眼于提高 $R_{\theta JA}$ ，即对环境的热阻。当对环境的热阻更大时，加热器功率中更大比例的热量将留在传感器内，因为热量更难散逸到周围空气中。

TI 建议最大限度减小 PCB 的热质量。激活加热器时，PCB 热质量越小，温升就会越大，因为热质量充当了热量的蓄积体。较大的热质量会将更多热量吸入 PCB。对 RH 传感器使用柔性 PCB 或薄型 PCB (< 32mil)，可最大限度提升环境感测能力和加热器温升。不过，FR4 62mil PCB 更为常见且制造成本更低，而且许多用户出于结构稳定性或优化温度和 RH 响应时间的考虑而焊接散热焊盘。与提高对环境的热阻相比，减小热质量会使加热器温升增加得更多，因此用户应优先考虑最大限度减小 PCB 的热质量。

加热器能量是第二个主要调节因素。虽然 HDC1x、HDC2x 和 HDC3120 没有可配置的加热器，但 HDC302x 系列 RH 传感器可以选择设置所需的加热器功率水平。如果不采取任何配置步骤，默认功率水平相对较低，而全功率设置则会最小化内部加热器电阻，从而最大限度提高产生的热量。对于采用 3.3V 电压的 HDC302x，全功率加热器设置通常为 249mW，最高可达 368mW。用户应验证使用加热器时电源以及 V_{DD}/GND 走线能否承受高达 100mA 的电流。HDC302x 中的其他加热器功率设置会降低最终达到的加热器温度，但这可能是可以接受的，具体取决于用户自己定义的 RH 漂移容差。此外，随着电源电压升高，加热器功率也会增加。在这种情况下，对于同一设计，采用较低的加热器功率设置来达到与 3.3V 全加热器功率相当的缓解效果可能更为合适。

3 功耗

与正常运行相比，使用加热器还会产生额外的功耗。本节旨在帮助用户了解平均功耗是多少。对于 HDC302x，在 3.3V V_{DD} 和全加热功率下，典型加热器功率为 249mW，最大可达 368mW。在此设置下， V_{DD} 的电流消耗可超过 100mA。这意味着即使仅短时间运行，加热器也会导致平均电流较 HDC302x 的正常工作电流显著增加。用户可使用以下公式计算平均 IQ：

$$I_{Q_{AVG}}(mA) = \left(\frac{HeaterTime_{ON}}{TotalTime}\right) * I_{Q_{HEATER}}(mA) + \left(\frac{HeaterTime_{OFF}}{TotalTime}\right) * I_{Q_{NOHEATER}}(mA) \quad (1)$$

例如，每分钟运行加热器 1 秒意味着加热器激活 1 秒，然后 59 秒不激活。即使在加热器激活后 RH 传感器需要 1-5 秒进行冷却，在此期间加热器也不再消耗升高后的电流。加热器关闭时的 IQ 是 HDC3020 消耗的正常平均电流，对于每秒一次的连续转换率约为 2μA。加热器开启时的电流在 3.3V 电源下可高达 100mA。由此得出的平均电流如下所示：

$$I_{Q_{AVG}}(mA) = \left(\frac{1second}{60seconds}\right) * 100mA + \left(\frac{59seconds}{60seconds}\right) * 0.002mA = 1.67mA \quad (2)$$

图 3-1 中对此进行了展示，以帮助直观展示功耗以及加热器如何以短脉冲方式运行：

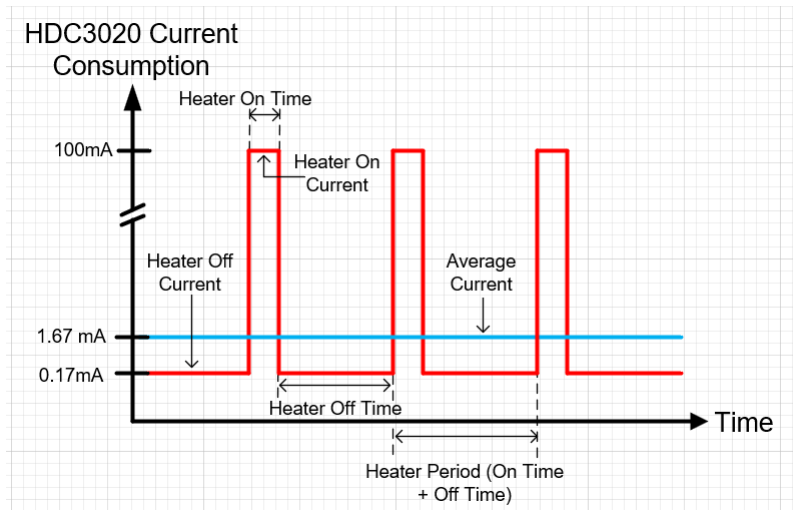


图 3-1. 加热器平均功耗示例

用户必须了解运行加热器所需的平均功耗，以及系统可分配给 RH 传感器的功率预算。降低加热器功率设置和电源电压可降低功耗，但两者都会削弱加热器的有效性。

为解决加热器激活方案的问题，本应用手册试图通过回答两个问题，为用户提供一个缓解高湿暴露所致 RH 误差的起点：加热器需要激活多长时间，以及应以多大频率运行加热器才能实现最佳的 RH 漂移缓解效果。本应用手册中的研究结果可帮助用户省去在系统中测试不同场景的时间，同时为缓解常见场景下的 RH 漂移提供经过验证的建议。

4 测试条件

本应用手册将通过实验演示使用加热器减少 RH 漂移的有效性。我们使用加热器测试了两种场景：一种是单次加热应用，旨在回答在发生孤立的高湿事件后需要多大程度的加热；另一种是连续校正应用，旨在回答当传感器持续处于高湿环境时，哪种周期性加热方案能够抑制 RH 漂移。

当 RH 传感器会在一段时间内暴露于高 RH 环境，但这种情况并非常态时，必须采用单次加热校正。如果高湿状态并非常态，就不存在需要周期性加热程序来持续缓解 RH 漂移的假设。高湿会导致一定程度的 RH 漂移，可以在高湿状况消退后使用加热器进行校正。RH 漂移可随时间推移缓慢自行恢复，因此使用加热器会加速水汽从传感器内部扩散回空气中，从而尽快提高 RH 精度。

当高湿状况频繁出现甚至持续不断时，必须采用连续加热校正。与单次加热校正中按需运行加热器不同，这种方法需要以固定的时间间隔运行加热器，以便在 RH 漂移实时发生时持续加以缓解。连续加热校正并不意味着加热器持续开启，而是指高湿暴露是连续性的。

图 4-1 中所示的测试板是一块搭载单个 HDC3020 的 PCB，采用 FR4 基材，厚度为 62mil。该 PCB 还焊接了散热焊盘。根据 TI 的建议，该 PCB 属于非优化设计，但这是有意为之的选择。该 PCB 是一种更常见的设计，更能反映大多数用户在系统测试中可能遇到的情况，因此结果可能对多数用户具有广泛的参考价值。

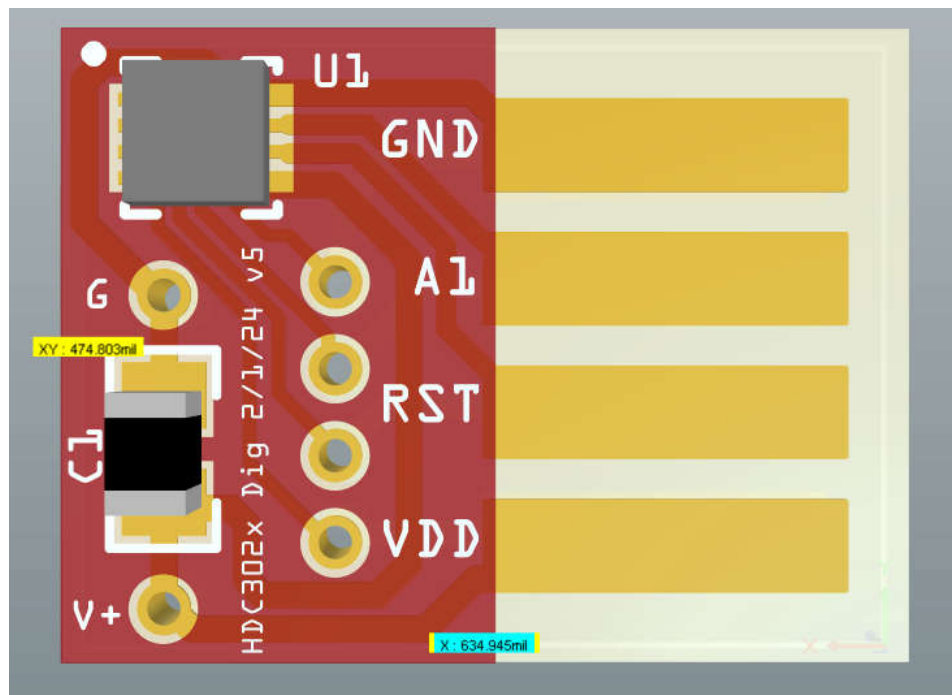


图 4-1. HDC3020 单板测试板

大多数测试均在 3.3V 下进行，这是 HDC3020 的标称 V_{DD} 电源电压。降低电源电压将减小加热器功率，提高电源电压则会增大加热器功率。选择 25°C 作为所有测试和应力施加的温度，因为作为常见的室温，该条件下的结果具有最广泛的适用性。环境温度也会影响加热器的性能。对于给定的设计，无论环境温度如何，加热器都能达到相同的最终稳态温度。这意味着较低的环境温度会导致更大的净温升，而较高的环境温度则会导致更小的净温升。用户可将此 25°C 数据作为其预期结果的基准，然后相应地调整其实验以匹配应用温度。

5 单次加热校正

当传感器遇到偶尔发生而非定期重复出现的高湿事件时，单次加热恢复是合适的模式。表 1 中的实验模拟了该应用场景：测量初始 RH 误差，将器件置于 25°C 且 90%RH 的环境中七天，测量偏移后的 RH 误差，然后施加不同持续时间的单次全功率加热脉冲，并再次在 30%RH、60%RH 和 90%RH 条件下测量 RH 误差。图 5-1 中的结果不是随时间变化而采集的，而是基于不同 RH 设定点而采集的。由于高湿暴露是暂时的，因此必须将图 5-1 中的结果视为一项恢复实验，而不仅仅是一张顺序图。

表 5-1. 单次 RH 漂移缓解步骤

步骤	说明	电源电压 (V _{DD})	加热器功率	温度	%RH
1	初始 RH 误差测试	3.3V	不适用	25°C	30%、60%、90%
2	置于 90%RH 下 7 天	不适用	不适用	25°C	90%
3	暴露后 RH 误差测试	3.3V	不适用	25°C	30%、60%、90%
4	将器件分成 3 组	不适用	不适用	25°C	不适用
5	第 1 组加热器 1 分钟，第 2 组加热 2 分钟，第 3 组加热 5 分钟	3.3V	全功率，约 250mW	25°C	50%
6	加热后 RH 误差测试	3.3V	不适用	25°C	30%、60%、90%

选择 90%RH 是因为已知这种高湿条件可在数小时内引发 RH 漂移，且在实验过程中无冷凝风险。在该条件下暴露七天，因为这段时间足以引发足够的 RH 漂移，使 HDC3020 超出 RH 精度规格。HDC3020 具有可配置的加热器功率水平，因此选择全功率设置以尽可能实现最大的温升。更大的温升可提高水汽分子的扩散速率，从而更好地缓解 RH 漂移。一分钟通常足以达到稳态温升。为了探究加热器需在稳态下运行多长时间，部分器件运行了更长时间，以观察能获得多大益处。

One-Shot Heater Correction

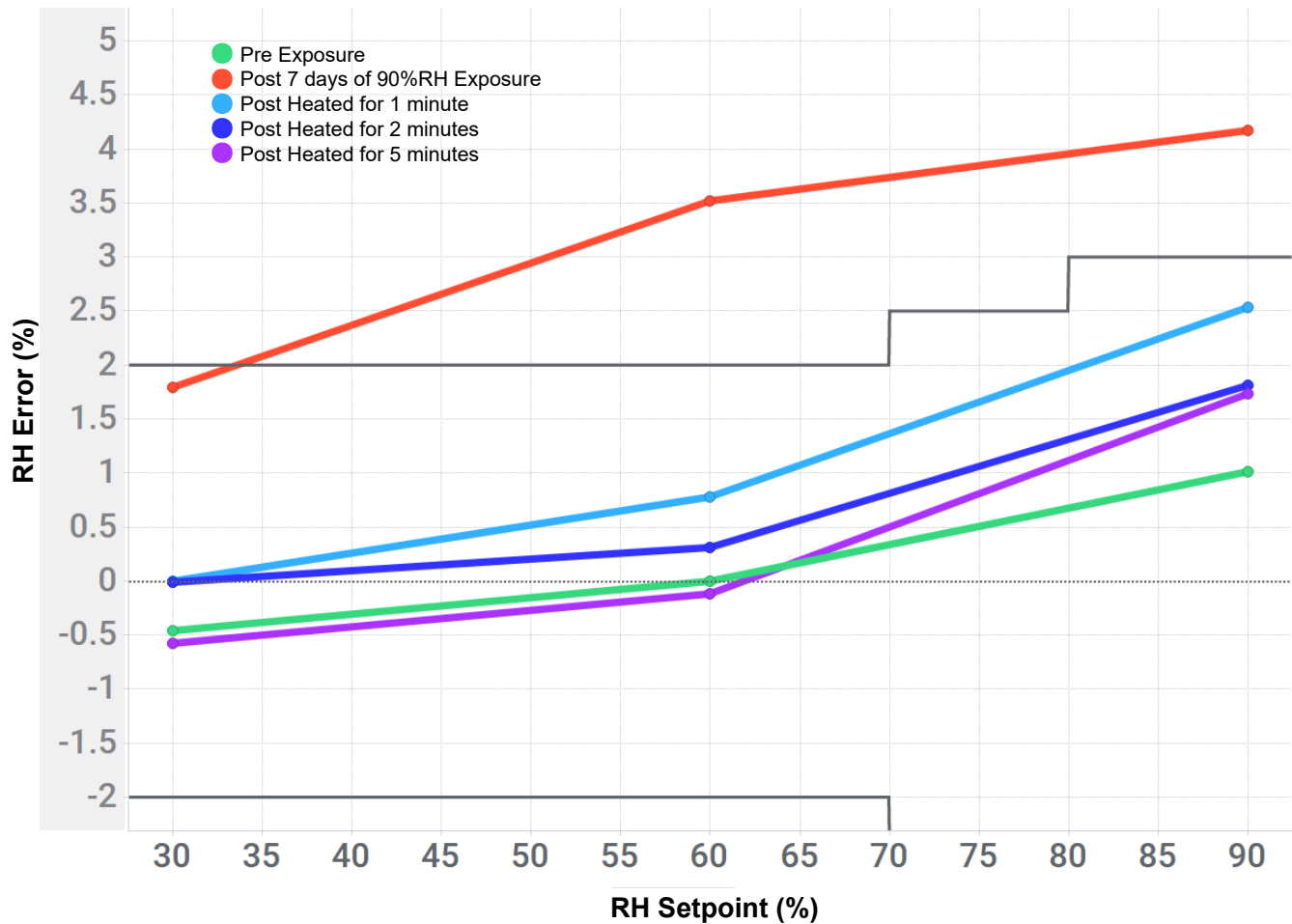


图 5-1. 单次加热校正：RH 误差与 RH 设定点间的关系

在图 5-1 中，绘制了相对于 RH 设定点的 RH 误差。该图并非展示 RH 从初始结果开始如何随时间变化，而是展示在施加不同步骤时，RH 误差在不同 RH 下如何变化。每条线代表 17 个 HDC3020 的结果平均值。RH 误差是在 25°C 下的多个 RH 水平下测量的。绿线显示了初始的时间零点 RH 误差。红线显示在 25°C/90%RH 下暴露 7 天后，未进行任何加热以消除 RH 漂移时的 RH 误差。蓝线和紫线显示了持续运行加热器不同时间后的 RH 误差。

一分钟全功率加热已使 HDC3020 的平均性能大幅恢复至接近原始水平，但两分钟加热在 60%RH 和 90%RH 下提供了明显更好的结果。五分钟加热仅对 90%RH 的结果有略微改善。因此，最具实用价值的工程结论十分简单：在该电路板上，以全功率运行加热器 2 分钟是进行单次恢复的最佳起点，而运行 5 分钟则更适合在功率和循环时间限制较少的情况下，可作为一种可选的高 RH 环境下的精细调整手段。若仅依据 30%RH 到 60%RH 的环境 RH 水平来判断，1 分钟加热即可提供与更长加热时间几乎相同的校正水平，同时可以将加热器运行时间至少减半，从而节省功耗。

6 连续加热校正

当预计高湿度会定期或连续出现时，周期性加热校正是合适的模式。将 HDC3020 器件按五个一组在 25°C/90%RH 条件下运行，其中三片为加热器件，两片为未加热的对照器件。图 6-1、图 6-2 和图 6-3 展示了两组 HDC3020 的平均结果。这些图展示了 RH 漂移随时间的变化，显示了随着高湿暴露的持续，加热器件中的 RH 漂移如何得到缓解。以下是不同的测试场景：

表 6-1. 连续高湿暴露加热校正尝试

场景	电源电压 (V _{DD})	加热器功率设置	环境温度	加热器电流	加热器功率	加热器开启时间	加热器关闭时间	加热周期	加热器激活所达到的最终温度	测试持续时间
1	3.3V	全功率	25°C	70mA	231mW	1 分钟	59 分钟	1 小时	51.7°C	72 小时
2	3.3V	全功率	25°C	68mA	225mW	5 分钟	55 分钟	1 小时	55.7°C	96 小时
3	3.3V	全功率	25°C	70mA	231mW	15 秒	59 分 45 秒	1 小时	43.7°C	72 小时
4	3.3V	默认功率	25°C	19mA	62mW	1 秒	59 秒	1 分钟	7°C	90 小时
5	1.8V	全功率	25°C	40mA	72mW	1 秒	59 秒	1 分钟	8.8°C	46 小时
6	3.3V	全功率	25°C	80mA	264mW	1 秒	59 秒	1 分钟	27.8°C	113 小时
7	3.3V	全功率	25°C	80mA	264mW	1 秒	29 秒	30 秒	27.8°C	67 小时

默认加热器功率是指未采取任何配置步骤时 HDC3020 的加热器功率设置。该实验结果仅适用于图 4-1 所示的 PCB。

对于所有连续加热校正场景，测试和测量始终遵循以下顺序：

1. 测量并记录 HDC3020 及校准后的基准温度和 %RH
2. 按照所需功率水平激活加热器并持续运行指定时间
3. 关闭加热器。
4. 等待“加热器关闭时间”结束。
5. 返回步骤 1
 - a. 该循环持续进行，直至完成总测试时长。

加热器停用后，将开始冷却。传感器温度再次与环境温度匹配的时间是可变的，具体取决于每个传感器和加热器能够达到的最终温度（如上所述，加热器的温升可能取决于电源电压、加热器功率设置和 PCB 设计）。该顺序确保了在下次测量之前，HDC3020 在整段加热器关闭时间内处于冷却状态。如果在 HDC3020 完全冷却（恢复到环境温度）之前进行测量，则 RH 结果会被人为降低，并可能高估 RH 漂移缓解效果。

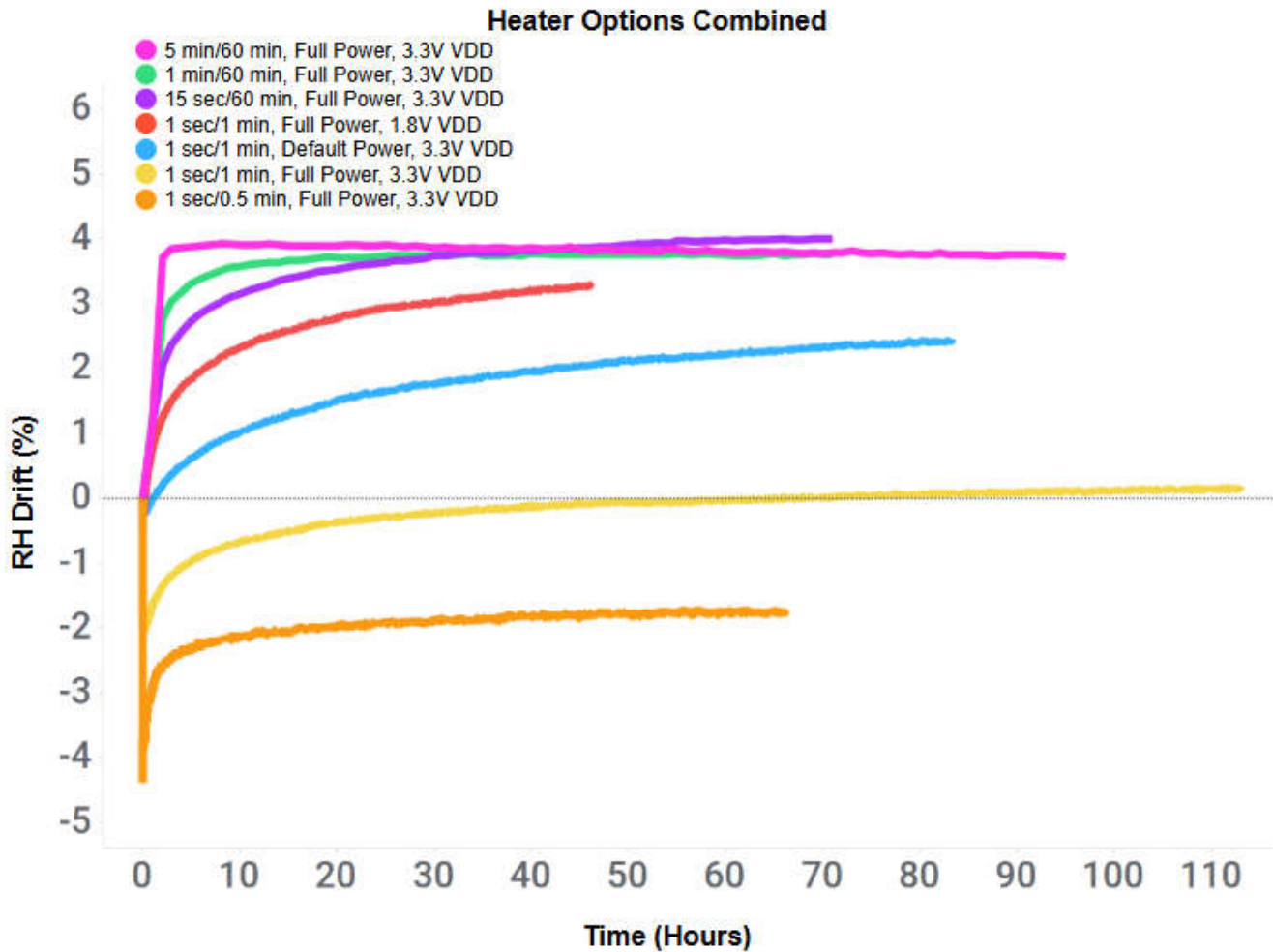


图 6-1. 连续加热校正：所有场景汇总

在图 6-1 中，所有连续加热方式显示在同一张图中。红色、蓝色、黄色和橙色曲线是每分钟运行加热器一秒钟的不同配置，所有这些配置似乎都比每小时运行加热器更长时间更为有效。对于该 PCB 设计，理想选择是在 3.3V V_{DD} 下启用全加热功率，每分钟加热一秒钟，以最大限度减少 RH 漂移。

图 6-2 和图 6-3 展示了全部七种连续加热校正场景的各个结果，并将加热器件与未加热对照器件进行了对比。下方每张图显示了相对于初始结果的 RH 误差偏移，为简化起见，对加热器件和对照器件的值进行了平均。加热器件为红色，未加热对照器件为蓝色。

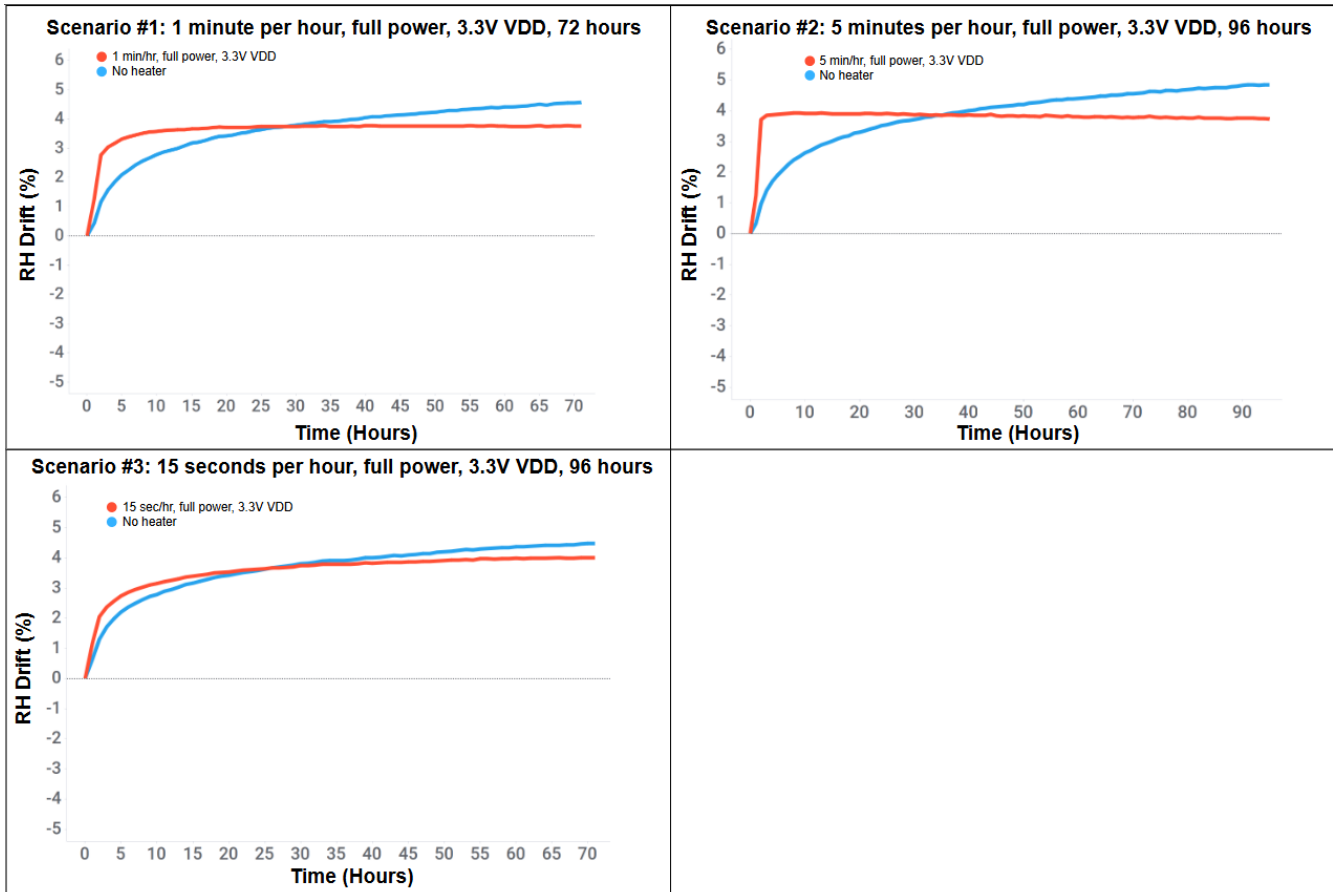


图 6-2. 连续加热校正场景 1、2 和 3

场景 1 显示，加热受测器件 (DUT) 仍出现显著的 RH 漂移，但其误差稳定在 3-4%RH 之间。对照器件在高湿暴露下持续漂移。加热器有助于减少 RH 漂移量，但剩余的 RH 漂移仅比未加热器件低约 1%，这极可能无法令人满意。场景 2 显示，加热 DUT 仍出现较大的 RH 漂移，但其误差也稳定在约 4%RH。加热器件还表现出 RH 漂移随时间推移而缓慢下降，但该下降时间漫长且不确定。场景 3 显示，每小时加热 15 秒比场景 1 提供的 RH 漂移缓解效果更弱，这符合预期。在场景 3 中，加热器件未呈现任何 RH 误差趋于平稳的迹象；因此，必须将此方案视为无效，不予推荐。

在场景 1-3 中，在每次运行的最初阶段，加热器件的 RH 漂移相比对照器件有所加速。这在场景 2 中最为明显，该场景下加热器每小时开启 5 分钟。出现此现象是源于水汽向传感聚合物内扩散。最初激活加热器时，它会去除传感聚合物中的水汽分子，从而使传感器按预期变干。然而，聚合物越干燥，水汽分子向传感器内扩散的速率就越快。因此，RH 漂移会加速，超过其通常的变化速率。达到足够饱和后，就会实现平衡：RH 漂移不再加速，而仅是补充因加热而损失的水汽。在场景 2 中，聚合物因加热而损失的水汽多于其在 55 分钟内能补充的量，因此 RH 漂移不断下降。虽然初始 RH 漂移加速看起来比什么都不做更差，但连续加热校正的目标是长期性能，而非传感器在最初几小时内的特性。当以较短的一秒脉冲运行加热器时，可以完全避免这种特性。

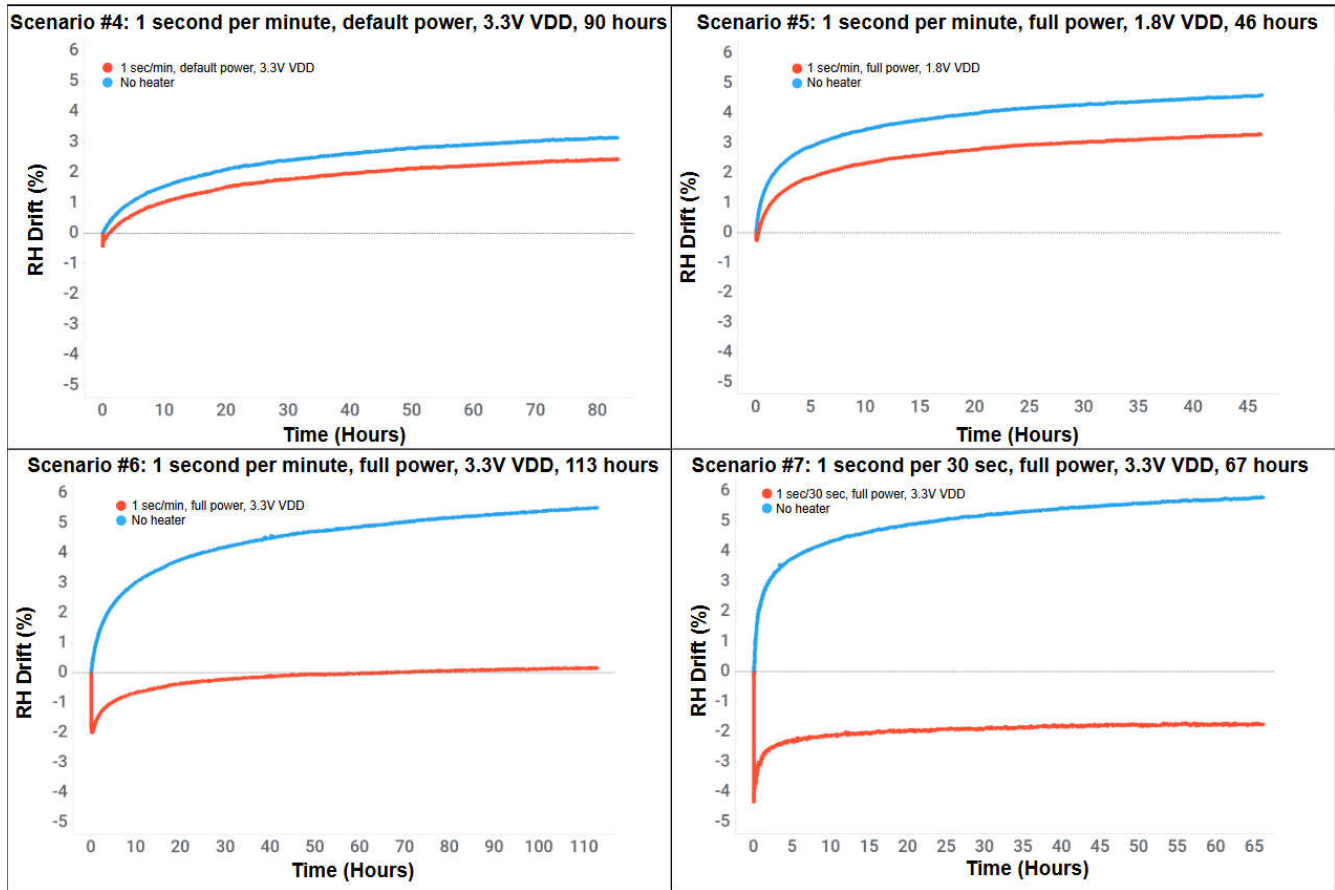


图 6-3. 连续加热校正场景 4、5、6 和 7

场景 4 表明，无论在测试开始时还是数天后，加热器都会降低整体 RH 误差水平。近 4 天后，RH 误差控制在约 +2.5%RH，但测试结束时仍在上升。使用默认加热器功率可节省功耗，但代价是 RH 误差缓解效果减弱。以高于每分钟一次的频率激活加热器，或许能在默认加热器功率水平下改善 RH 漂移缓解。场景 5 中的性能略逊于 3.3V 下的默认加热器功率设置。在 1.8V 下，加热器功率低得多，因此加热器对 RH 误差的改善效果更弱。如果在 1.8V 下工作，可考虑以高于每分钟一次的频率激活加热器，以改善 RH 漂移缓解效果。由于结果未显示出充分的校正效果，为节省时间，在 46 小时后终止了测试。

场景 6 显示，在此设置下，RH 漂移保持在非常接近 0% 的水平。暴露于 90%RH 下近五天后，RH 漂移仍保持接近 0%，且上升速率极为平缓。在场景 7 中，加热器件的 RH 误差快速下降，随后保持一致的 RH 水平，漂移为 -2%RH。虽然此设置可能导致负向 RH 漂移，但正向 RH 漂移的影响（即过量水汽吸收所带来的影响）得到了非常好的缓解。然而，与场景 6 的结果相比，由于加热脉冲的频率翻倍，电流消耗实际上也已翻倍。对此 PCB，每分钟全功率运行加热器 1 秒可实现最优的 RH 漂移缓解。

如场景 4-7 所示，在激活连续加热的最初几分钟内，RH 漂移会出现初始下降，其中场景 7 最为显著。这是由于在高湿度开始导致 RH 读数偏移之前，初始加热脉冲去除了传感器中的水汽。这种下降只是暂时的，在使用加热器几分钟后便会消失。用户应专注长期校正收益，而非测试开始时的瞬态结果。

7 总结

表 7-1. 单次加热校正结果汇总

%RH 设定点	初始 %RH 误差 (%RH)	90%RH 暴露后 %RH 误差 (%RH)	全功率加热 1 分钟后的 %RH 误差 (%RH)	全功率加热 2 分钟后的 %RH 误差 (%RH)	全功率加热 5 分钟后的 %RH 误差 (%RH)
30%RH	-0.46	1.79	-0.01	-0.01	-0.58
60%RH	0	3.52	0.77	0.31	-0.12
90%RH	1.01	4.16	2.53	1.81	1.73

表 7-2. 连续加热器校正结果汇总

场景	连续加热时序	最终 RH 漂移 (%RH)
场景 1	每小时 1 分钟、全功率、3.3V V _{DD}	3.75
场景 2	每小时 5 分钟、全功率、3.3V V _{DD}	3.73
场景 3	每小时 15 秒、全功率、3.3V V _{DD}	4.00
场景 4	每分钟 1 秒、默认功率、3.3V V _{DD}	2.42
场景 5	每分钟 1 秒、全功率、1.8V V _{DD}	3.27
场景 6	每分钟 1 秒、全功率、3.3V V _{DD}	0.18
场景 7	每 30 秒 1 秒、全功率、3.3V V _{DD}	-1.77

有许多变量会影响使用加热器缓解高湿条件所致 RH 误差的有效性。用户必须通过测试来确定适合其系统的加热器设置和运行方案。为了优化加热器性能，用户需要重点关注其控制范围内的变量，以最有效缓解 RH 漂移。用户可以控制的两个主要方面是 PCB 设计和加热方案。

PCB 设计可归结为两个因素：对环境的热阻 ($R_{\theta JA}$) 和热质量 (M_T)。PCB 的热质量还将决定最终的上升时间，并可能对加热器性能产生巨大影响。热质量较小的 PCB 在加热器工作时的散热效应较弱，从而使更多热量留在传感器中。这种热量差异可从表 6 看出，其中 ΔT (°C) 一列显示，无论 V_{DD} 多大，柔性 PCB 的温升都远大于图 4-1 中所示的刚性 FR4 PCB。

对环境的热阻将决定加热器产生的热量在传感器中的保留程度。 $R_{\theta JA}$ 越大，保留的热量越多，意味着温升效果越好。 $R_{\theta JA}$ 越小，散逸到空气中的热量就越多，留在传感器中的热量就越少，导致温升效果变差。焊接散热焊盘可降低 $R_{\theta JA}$ ，因为焊盘提供了一条低热阻路径，使能量得以从传感器逸出。因此，要使用加热器达到更高的最终温度，建议不焊接散热焊盘。实际上，如果相对于环境的温升较大，则在连续校正期间加热器的激活频率可能不需要那么高。反之，如果温升很小，加热器将无法有效缓解 RH 漂移。场景 4 证实了这一点，其中默认加热器功率水平无法提供足够的热量，无法以与水汽进入传感器相同的速率将其去除。

表 5 表明，计算得出的柔性 PCB 热阻远高于本文收集的所有加热器校正数据所用的刚性 FR4 测试 PCB。再加上热质量小得多，柔性 PCB 使用加热器时产生的温升要大得多。表 5 还显示，即使是刚性 FR4 PCB，将电源电压从 3.3V 提高到 5V 也会显著提高加热器的最终温度。就本文档而言，表 7-3 中 PCB 上的所有 RH 传感器均已焊接散热焊盘。

表 7-3. 刚性和柔性 PCB 的加热器温升与热阻计算

		V _{DD} (V)	I Avg (mA)	P (mW)	Δ T (°C)	R _{θJA} (°C/W)
加热器关闭	柔性	5	0.17	0.87	0.61	700.17
		3.3	0.16	0.54	0.38	694.40
	刚性 FR4 PCB	5	0.17	0.87	0.22	253.03
		3.3	0.16	0.54	0.12	229.49
加热器开启	柔性	5	23.5	117.50	78.89	671.44
		3.3	17.5	57.75	39.42	682.74
	刚性 FR4 PCB	5	26.2	131	32.39	247.21
		3.3	18.7	61.71	14.53	235.58

无论是不使用全加热功率配置，还是使用较低的电压（如 1.8V），降低加热器功率水平都会削弱加热器缓解 RH 误差随时间增长的能力。使用 FR-4 PCB 的实验结果表明，无论是 1.8V 全加热器功率还是 3.3V 默认加热器功率，都不足以提供足够的热量来阻止测试期间 RH 漂移的增长。如果用户因电流消耗限制或较低的 V_{DD} 电平而被迫使用较低的加热器功率水平，可以通过进一步优化 PCB 布局和组装来提高加热器的效率。例如，使用柔性 PCB 甚至更薄的 FR4 PCB（例如 31mil）将减小 PCB 的热质量，使更多热量留在 RH 传感器内，从而产生更大的温升。

为成功缓解 RH 漂移，这些 PCB 设计要素需要是经过深思熟虑的选择，以在加热器能力与更广泛的系统制约因素之间取得平衡，而非随意决定或事后弥补。一旦确定 PCB 设计，可能需要进行反复测试来得到优化的合适加热方案，以便按必要的频率使用加热器，同时避免过度使用以尽量减少功耗（如果这是关注重点）。用户应当对部署传感器的最终应用温度和湿度条件有所了解。这些条件应尽可能在实验室环境中复现，理想情况下使用恒温恒湿箱。

如果应用场景中会反复出现冷凝、清洗暴露或存在进水风险，应考虑在设计中纳入带防护罩的器件型号及机械屏蔽，而非仅依赖加热器的作用。

对于连续的高湿校正，与以更长间隔进行更长时间的加热器激活相比，更频繁地执行短时热脉冲的效果要好得多。这表明用户无需让加热器达到稳态高温即可产生效果。事实证明，以每分钟 1 秒脉冲的方式运行加热器是缓解 RH 漂移的有效策略，且每分钟加热 1 秒（在 3.3V 和全加热功率下）的效果最佳，TI 建议用户在调试如何利用加热器缓解连续 RH 漂移时，以此作为起点。这实现了最佳平衡，既缓解了 RH 漂移，同时又高效利用了加热器并避免了过多的电流消耗。

对于因孤立的高湿时段而产生 RH 漂移的单次加热校正，在全加热功率下持续加热 2 分钟或 5 分钟的较长时间优于不进行校正或仅加热 1 分钟。与加热 2 分钟相比，加热 5 分钟仅带来略微改善，而加热 2 分钟足以使传感器在 50%RH 下恢复到规格要求。由于不同用户系统之间存在差异，确定合适的加热时间量同样需要进行测试，但达到持续几分钟的稳态加热温度对于单次 RH 漂移恢复最为有用。

7.1 分步讲解

以下指南说明了用户如何将本应用手册的研究结果和测量技术应用于其设计。文中的 RH 漂移数值和电流消耗水平是为演示迭代分析方法而基于这些示例进行估算的；用户需通过测试确定其自身设计和环境条件下的真实数值。TI 建议每次测试使用未发生过漂移的 RH 传感器。在测试迭代中重复使用相同器件可能产生复合 RH 漂移效应，致使难以确定特定加热器校正方案的成功程度。

对于第一个示例，可考虑采用 HDC3020 的设计。HDC3020 部署于 25°C 和 90%RH 的环境中。由于 RH 较高，可认定在环境暴露期间会发生一定程度的 RH 漂移，但确切偏移量未知。此外，有限的功率预算要求平均电流消耗不超过 1mA。

第 1 步：定义要求

- 可接受的 RH 漂移：此时，HDC3020 在该环境下的实际 RH 漂移是未知的，但必须定义通过/失败标准。在本例中，RH 漂移不得大于 +2%RH。
- 功率预算：平均电流消耗不得大于 1mA。

第 2 步：PCB 注意事项

- 理想情况下，PCB 设计应针对加热器性能进行优化，详见节 2 和节 7。然而，用户常常出于 RH 漂移缓解优化之外的原因，在 PCB 设计的至少某些方面受到限制。在本例中，系统设计必须采用 62mil 厚的 FR4 材质 PCB。不过，仍可进行一些优化。
 - 最大限度减小热质量：**如果可以修改 PCB 结构，减薄 PCB 可以减小热质量。由于无法将 PCB 做得更薄或采用柔性 PCB，在传感器放置位置制作一个引脚切口可减少传感器周围的 PCB 材料量，并略微减小热质量，从而降低加热器能量从传感器被吸走的能力。
 - 最大限度提高对环境的热阻：**由于在无法改变 PCB 结构的情况下热质量很难修改，因此最大限度提高对环境的热阻将有助于提高加热器温升。在这种情况下，选择不焊接散热焊盘将使更多加热器功率保留在传感器内，从而改善 RH 漂移校正性能。
 - 注意：**最大限度减小热质量和最大限度提高对环境的热阻并非二选一。为了尽可能获得最佳的加热器性能，必须尽可能同时做到这两点。

第 3 步：选择初始方案：连续加热校正

- 在本例中，HDC3020 持续暴露于高湿条件下，因此适合寻找在高湿暴露期间定期使用加热器的方案。如果高湿暴露不常发生，适合采用单次加热方案，因为一次校正就足够了。

第 4 步：初始连续校正设置与测试

- 根据本应用手册的研究结果，请使用以下起始条件：
 - 电压与加热器功率：**本应用手册建议用户从 3.3V 电源电压开始并使用全加热功率设置。但是，这些设置组合下的平均电流消耗 1.67mA 将超过既定的 1mA 电流限制（有关如何得出该电流的详细信息，请参阅节 3）。因此，必须降低电源电压或加热器功率水平以满足电流限制。TI 建议首先修改加热器功率。这是因为加热器功率水平是通过编程设定的，在测试迭代之间相对容易更改。改变电源电压是另一种选择。如果首次测试未能显示出足够的 RH 漂移缓解效果，且加热器已处于全功率设置，则提高电源电压将会增加加热器功率。
 - 为了降低消耗的电流，加热器功率将降低至半功率设置。本例中选择半功率设置，是因为数据表中详细给出了该功率水平，使得给定电源电压下的加热器电流消耗易于计算。电源电压暂时保持在 3.3V，以便与本应用手册中的结果进行更好的比较。
 - 加热方案（起点）：**将加热器脉冲初步设置为每分钟发生一次，每次持续 1 秒。
 - 在此加热方案下，采用 3.3V 电源和半加热功率，平均电流消耗约为 0.69mA。
- 设置：**测试环境必须能够复现预期会导致 RH 漂移的环境条件，或在可行的情况下直接在该环境中进行测试。TI 建议在温湿度箱中执行这些测试。RH 传感器需对照经 ISO 17025 校准的湿度基准进行评估。
- 监测：**对 RH 传感器进行 72 小时测试。72 小时足以引发大部分 RH 漂移，同时又不会过长。根据本应用手册节 6 中所述的方法，必须每分钟采集一次 RH 读数。漂移测试还必须包含不进行加热校正的对照组，以了解此环境条件下会产生多大的 RH 漂移。
- 72 小时后的结果：**对照传感器漂移了 +5%RH，而加热器件表现出约 +2.5%RH 的正向 RH 漂移。

第 5 步：迭代与优化

- 平均电流消耗要求已得到满足，但 RH 漂移仍然过高。
- 基于这些结果，要么必须增加加热器功率，要么必须修改加热方案，以提高加热器运行频率。
 - 当可以改变多个变量来影响 RH 漂移结果时，从最容易改变的变量开始。在本例中，更改加热方案使其略微更频繁地运行会更容易。将加热器功率水平提高到全功率与半功率之间的另一设置，会导致其电流消耗未知，需要对其进行表征，以确定其是否适合本系统的功率预算。更简单的方法是保持加热器功率为半功率，提高加热器脉冲频率，以更频繁地蒸发多余水汽。
 - 再次计算公式 1，这次采用更短的加热器关闭时间。使用每 30 秒一次的 1 秒脉冲，得到的平均电流消耗为 1.38mA，仍然过高。将加热器关闭时间延长至 45 秒，得到的平均电流消耗为 0.92mA。该值处于平均电流消耗限值以内。
- 加热器保持半功率，但现在每 45 秒激活一次，而非每 60 秒一次。进行第二次 72 小时测试。
 - 本次测试改善了 RH 漂移缓解，72 小时后将 RH 漂移限制在 +1.5%RH。平均电流消耗为 0.92mA。RH 漂移得到进一步改善，且电流消耗保持在限值以内。

基于 RH 漂移测试和系统限制，在此场景中，使用连续加热校正方案，以半加热功率每 45 秒进行一次 1 秒加热脉冲，在 RH 漂移缓解和功耗之间实现了最佳平衡。

某些应用所需的温度和湿度环境比本应用手册迄今所呈现的更为极端。当高温与高湿同时存在时，RH 漂移将变得更严重，因为空气中的水汽量远高于 25°C/90%RH 时的水平，因此需要更高的扩散速率来防止水汽在传感器中积聚。然而，在这些条件下，加热器有效性会降低，因为高环境温度将导致更小的温升。在此情况下，系统制约因素（例如电源电压限制或电流消耗限制）通常需要改变，以找到能够产生有效 RH 漂移缓解的加热器功率水平和加热方案：

- 功耗：提高可消耗的功率上限，以便加热器能够更频繁地运行、运行更长时间和/或在更高的功率水平下运行。
- 电压：3.3V 电源电压过低，无法产生足够的温升，使加热器无法获得有意义的温升来有效扩散多余水汽。必须将电源电压提高到 5V 甚至 5.5V，以增加加热器的功率。
- 加热方案：可以每 30 秒而非每分钟运行一次加热器，或采用稍长的脉冲持续时间。
- PCB：可能还需要更改 PCB 以优化加热器性能。首先在 PCB 上使用一个新传感器，但不焊接散热焊盘。如果这还不够，可能需要更薄的 PCB 或柔性 PCB，以使加热器产生更好的温升。
- RH 漂移要求：根据这些要求中哪些可以改变、哪些不能改变，如果加热器被证明不足以缓解 RH 漂移，则可能需要在系统中调整可耐受的 RH 漂移量。

继续迭代可以更改的要求，从最容易调整的要求开始，并评估加热器件的 RH 漂移，以了解可实现的最佳 RH 漂移缓解效果。如上述示例所示，某些环境条件更具挑战性，但在许多环境中定期使用加热器仍有助于缓解 RH 漂移。

8 参考资料

1. 数据表
 - a. [HDC1080](#)
 - b. [HDC2080](#)
 - c. [HDC3020](#)
 - d. [HDC3120](#)
2. 硅器件用户指南
 - a. [HDC2x 器件用户指南](#)
 - b. [HDC3x 器件用户指南](#)
3. 应用手册
 - a. [湿度传感器比较指南](#)
 - b. [TI 湿度传感器：编程和集成指南](#)
 - c. [如何调试 RH 传感器中的 RH 精度问题](#)

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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月