参考文献

Application Note

基于湿度传感器的汽车电子产品进水监测

Alex Thompson, Sakeenah Khan, Carolus Andrews

Temperature & Humidity Sensing

摘要

进水或渗水可能会对许多应用中使用的关键电子元件构成重大威胁，其中包括电动助力转向 (EPS)、EV 电池组、激光雷达和液冷服务器等汽车和企业系统。本应用手册介绍了一种基于湿度传感器的检测方法，该方法使用相对湿度 (RH) 的转换率（例如变化率）作为进水事件的指示符，利用 HDC3020 传感器快速识别密封或通风电子外壳中的进水情况。具体而言，可在 10 秒窗口内计算 RH 转换率，并将其与阈值进行比较，以检测何时发生进水事件。此方法可在数秒内可靠地检测到轻微的泄漏事件（1.7L 外壳中 ≤0.07mL）。这优于传统的 PCB 迹线电极水传感器，可增强系统可靠性，减少误报，并简化传感器部署。

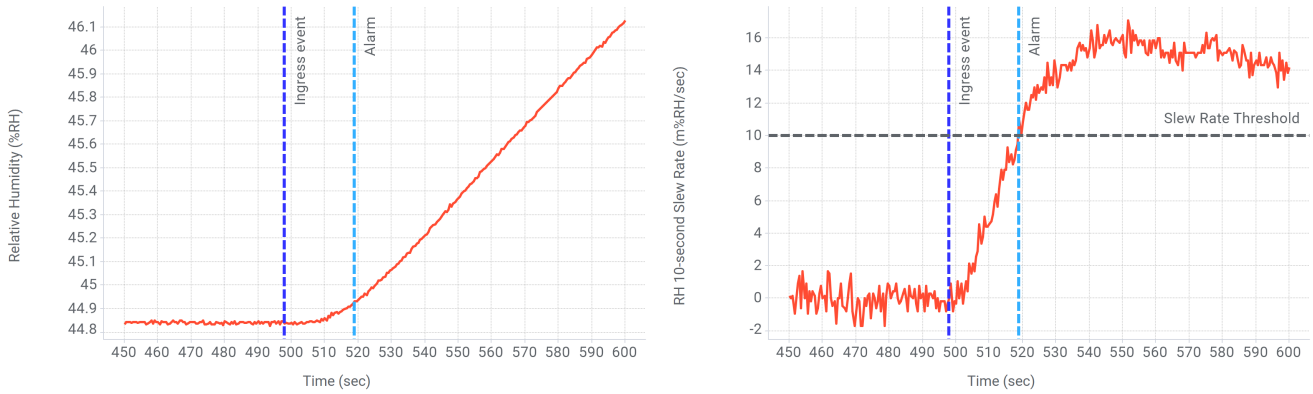

图 1-1. 使用 RH 转换率阈值检测进水情况

内容

1 简介.....2
1.1 动机.....2
1.2 湿度和进水的物理学原理.....2
2 测试方法.....3
3 假设.....4
4 采用转换率阈值的建议算法.....5
5 测试结果.....6
5.1 室内环境条件下的测试结果.....6
5.2 高温和低温条件下的测试结果.....10
5.3 通风口浸没和空气交换测试.....11
6 总结.....13
7 参考资料.....14

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SNAA420

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

1 简介

1.1 动机

现有技术正受到对更高效率和性能的新需求的挑战。例如，在过去十年内，电动汽车 (EV) 的普及度激增，由于电动汽车通常配备更多电子元件，因此面临进水风险的电子系统数量也相应增多。同样，随着存储和计算工作负载迁移到云端，数据中心也在迅速扩展，需要更高的性能和密集的冷却。这些趋势带来了新的工程挑战，包括对液体冷却的依赖更大，进而增加了电子系统发生漏水的风险。

电动助力转向 (EPS) 就是顺应这些趋势而开发的子系统的一个示例。虽然仍在使用液压动力转向，但 EPS 通过仅按需而非连续运行辅助电机来提高效率。最初，EPS 电机被放置在车厢内（转向柱上）以确保其得到保护，但这种配置使得驾驶员的路感低于液压系统。该设计已更新为将 EPS 电机移到轴距上，以增强转向感觉。但是，将电机和控制电子元件放置在车轮附近会使它们暴露于环境。防尘罩磨损或密封件故障会导致水渗入电子系统，最终导致电子元件遭受最严重的一种损害：进水。

1.2 湿度和进水的物理学原理

一般而言，进水应用的主要目标是可靠地检测并通知外壳内是否存在水。考虑到这一点，一些终端应用可能需要能够区分进水和冷凝情况。在本次调查中，假设外壳中的任何水分都可能被视为有问题，因此被视为进水。如果没有外部干扰导致特定因素出现，温度或 RH 的变化通常会在较长的时间内缓慢发生。因此，测量温度或 RH 时的测试窗口时间通常大于大多数电子算法的窗口时间，因此在实际应用中，窗口时间可延长至 60-120 秒。

相对湿度是最常见的湿度测量方法。它被定义为空气中存在的水蒸汽相对于该温度下最大容量的百分比。这主要衡量：空气中有多少水？在 100% 相对湿度下，空气完全饱和——任何额外的水分都会凝结成液态水。从数学角度而言，RH 量化了水蒸汽现有分压与相同温度和压力下饱和蒸汽压之间的差距（如 方程式 1 所示）。

$$RH = \varphi = \frac{WaterVaporContent}{Max.WaterVaporCapacity} \equiv \frac{CondensationRate}{EvaporationRate} \equiv \frac{ActualVaporPressure}{SaturationVaporPressure} \quad (1)$$

RH 与温度高度相关，如果温度升高，RH 就会下降（对于相同的绝对水分含量）；如果温度下降，RH 就会上升。这是因为随着温度升高，空气的饱和蒸汽压也会升高，而实际蒸汽压保持不变（假设没有引入新水分）。这种行为使得用于泄漏检测的简单湿度阈值变得颇为复杂。如果有足够的时间，通风外壳的湿度可能会因环境条件缓慢上升到较高的 RH 水平，如果仅依赖绝对 RH 水平，则可能会触发误报。然而，这种渐进的变化发生得非常缓慢，因此关注湿度的转换率（或变化速率）就能将其滤除。

绝对湿度 (AH) 本身并不能作为检测通风系统中进水情况的可靠指示器。AH 不受温度明显影响——这只表示每单位体积的水量。但是，由于体积会随温度和压力的变化而变化，因此即使没有添加或去除水，气包的 AH 也会发生变化。如果空气膨胀（例如，上升到压力较低的高空），则 AH 会降低（相同的水分子现在占据更大的体积）。通风口有助于压力均衡，但如果未配备通风口的封闭容器冷却，空气会略微收缩，AH 会轻微升高；更重要的是，一些蒸汽会凝结，从而降低 AH（因为这些分子脱离气态）。

蒸发是指液态水通过状态变化转化为水蒸汽的过程。水从液态到蒸汽态的变化通常被视为水的沸点。然而，只要水分子表面能获得足够的能量，蒸发现象就会在任何温度条件下发生。发生漏水时，液态水会立即开始蒸发。蒸发的速度会因系统温度和水量的不同而有所差异。湿度传感器 IC 会检测这种新引入空气中的水蒸汽引起的 RH 变化。蒸发量可能因系统中的环境湿度而异。如果空气干燥（RH 低），则蒸发速度会升高。如果空气湿润（RH 高），则蒸发速度会降低。这一点很重要，因为进水可能在不同的温度和湿度条件下发生，因此会影响系统中 RH 随时间的变化情况。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

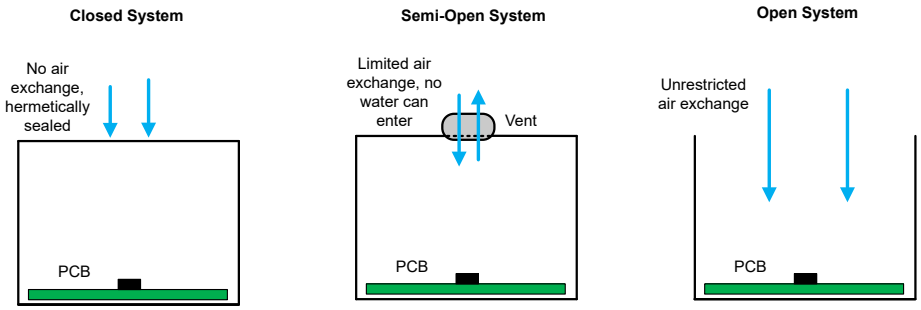

图 1-1. 闭合、半开放和开放系统

本实验中未评估的一种情况是开放系统。下述测试外壳是半开放系统，测试结果也适用于完全封闭系统。开放系统意味着电子元件完全暴露在空气中，并且可能接触到水。例如，存在进水问题的开放系统可能是液冷服务器。服务器和电子元件会与周围环境进行自由且不受控制的空气交换，但液体被保存在管道中，因此需要对其进行监测以检查是否存在泄漏。封闭系统是指系统内部和外部不存在空气交换的系统。密封系统是封闭的系统。半开放系统是指通过过滤通风口或渗透膜与外部环境进行一些受控且有限的空气交换。通过在测试设置中采用保护性通风口，本应用手册介绍了如何检测半开放系统中的漏水情况（测试结果也适用于封闭系统）。开放系统更容易受到环境空气中大摆幅和 RH 水平的影响，这会导致利用变化率阈值来检测进水的情况变得复杂。

2 测试方法

专门设计了定制测试外壳，以评估实际条件下的进水检测性能。该外壳在各种温度和湿度条件下都坚固可靠，能够灵活适应各种测试场景，并能真实反映典型的通风电子元件外壳的特性。

在对该外壳外部的传感器开展主实验之前，还对另一种测试场景进行了评估，其中水滴被直接滴落在 HDC3020 传感器腔体上。在这种情况下，传感器读数会瞬时降至 0% RH 并持续几秒钟，然后上升到原始值以上，直至水分蒸发或被移除（之后恢复到正常读数）。几乎瞬间降至 0% RH。这种独特的特征明确表明水已进入传感器腔体，且与本研究所测试的变量（如环境条件、外壳类型或尺寸、水量等）无关。在预期会有液态水且必须避免此类行为的情况下，可选用 HDC3022 作为替代器件，该器件配有 IP67 级防水过滤器。

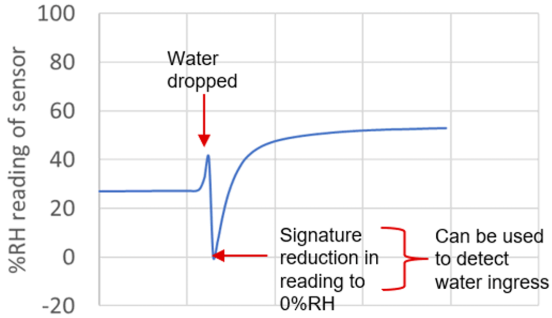

图 2-1. 当水滴直滴入传感器腔体时 HDC3020 的 RH 值变化

测试外壳用于模拟以下半开放电子系统：顶部设有一个防水通风口，以允许空气交换。通风口有两个用途：一是模拟真实世界的外壳（很少密封），二是防止在测试过程中泵入经调节空气时压力积聚。如果没有该通风口，从外部腔室引入潮湿或干燥的空气可能会对箱体过度加压。这种额外的压力可能会以不同于水进入电子系统的方式改变 AH。

在外壳内，测试 PCB 装有 HDC3020 传感器（安装在小型凸板上），因此不会被任何进水淹没。水通过漏斗引入，以模拟缓慢滴水或快速倒水的情形。PCB 旁增设了散热器和加热器，以改变外壳内部的温度。如此一来，无需将整个外壳放入加热环境箱内，即可将外壳加热到较高的温度。通过气送管连接方式将潮湿干燥的空气直接输送到测试外壳中。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

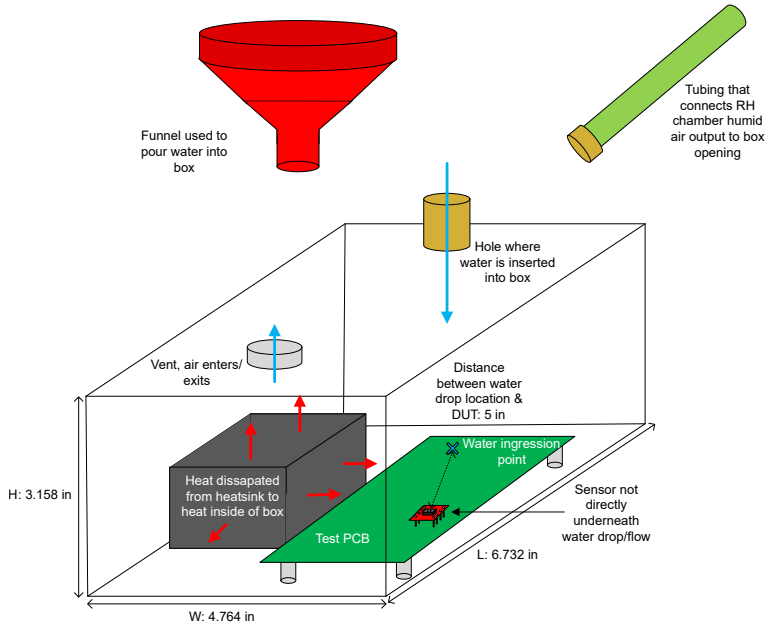

图 2-2. 配备内部和外部元件的通风测试外壳

在各种环境条件下进行测试，以确保检测算法在可能发生进水的各种情况下都能正常工作。在汽车和工业应用中，泄漏可能发生在低温干燥环境和高温潮湿环境中。因此，在几个具有代表性的条件下对电子系统进行了评估。

表 2-1. 实验试验总结

测试编号	温度 (°C)	相对湿度 (%RH)	水量	如何进行测试？
1	22°C	45-50%	一滴水 (0.023mL)	室内环境条件、无强制潮湿空气
2	22°C	45-50%	三滴水 (0.07mL)	室内环境条件、无强制潮湿空气
3	22°C	45-50%	全水流量 (100mL)	室内环境条件、无强制潮湿空气
4	22°C	70%	全水流量 (100mL)	室内环境条件、强制潮湿空气
5	50°C	10%	三滴水 (0.07mL)	外壳内部加热、强制干燥空气
6	50°C	70%	三滴水 (0.07mL)	外壳直接置于湿度箱中
7	10°C	10%	三滴水 (0.07mL)	外壳置于冰浴中冷却、强制干燥空气
8	10°C	70%	三滴水 (0.07mL)	外壳置于冰浴中冷却、强制潮湿空气

测量的 1 滴水容量约为 0.023 mL，3 滴水容量约为 0.07mL。对于水滴测试，在使箱体湿度达到设定水平后，移除加湿空气管，并使用滴管将水通过黄铜安装孔沉积到外壳中。对于*全流量* (100mL) 的水测试，使用漏斗将水倒入同一个安装孔中。将水倒入外壳后，可将连接气送管以泵入潮湿空气的黄铜安装孔关闭，以防止蒸发的水汽和潮湿或干燥空气溢出。

所有测试条件均使用三滴水进行评估，以模拟轻微漏水的情况。"全水流量"测试旨在模拟大量水流进入电子系统。过热测试并未使用大量水，因为将大量水倒入外壳中需要在每次测试之间进行彻底清理，并且通常还需要拆卸测试外壳。此外，使用少量的水是最不利于湿度传感器检测的测试情况，因为蒸发到空气中的水蒸汽量要少得多，这实际上是对建议的 RH 转换率阈值方法进行的更严格的测试。最后，测试 1 进行了 1 滴水测试，以探究 HDC3020 在给定测试外壳尺寸下可靠地检测到进水事件的精细程度究竟能达到何种程度。

3 假设

对于此次漏水检测实验，我们做了若干假设以缩小测试范围：

- **外壳中装有一个通风口，用于实现压力均衡。**这可以防止内部温度变化时的压力积聚。在该实验中，TI 使用了一个防水通风口，以使潮湿空气与外界空气进行交换，从而实现压力均衡，同时防止液态水进入。虽然这构成了一个半开放系统，但该假设仍然允许实验结果适用于封闭系统。标称密封系统不会产生内部压力。即使是在大气压下完全密封的封闭系统，在发生泄漏事件时被刺穿也不会导致压力变化。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

- **每次测试开始时，该系统都会在干燥、已知良好的状态下启动。**该算法假设在时间零点时，外壳中没有水。接受测试的外壳在每次试验开始时都是完全干燥的。确定系统在启动前是否受潮不在这些测试的明确范围内。进水是单一事件。
- **每次测试期间，温度保持恒定。**TI 假定在泄漏事件发生期间未发生明显的升温或降温情况。对于高温和低温测试，事先将水温调节到目标温度，以避免因温度变化而对湿度产生任何影响。

4 采用转换率阈值的建议算法

检测进水事件的建议方法是适用 RH 转换率阈值检测进水情况。湿度传感器需要被设置为以每秒 1-2 个样本 (1-2Hz) 的速率测量 RH。然后，需要在 10 秒窗口内计算转换率。为计算 10 秒 RH 转换率，首先需要通过取当前 RH 测量值 (RH_N) 和 10 秒前的测量值 (RH_{N-10}) 之间的差值来获得 ΔRH。然后，将 ΔRH 除以 Δtime 再乘以 1000，得到以 m%RH/s（毫百分比 Rh/秒）为单位的转换率，计算公式如 方程式 2 所示。

$$RH \quad Slew\ Rate\left(\frac{m\%RH}{sec}\right) = \frac{\Delta RH}{\Delta time} = \frac{1000 \times (RH_N - RH_{N-10})}{10\ sec} \tag{2}$$

该计算可在软件中进行，并且需要在数据缓冲器（例如 FIFO（先入先出）缓冲器）中存储最后 10 秒的 RH 测量值。图 4-1 以流程图的形式显示了建议算法。在给定稳态温度和压力的情况下（如假设章节所述），在各种温度和湿度条件下对转换率阈值方法进行了测试。

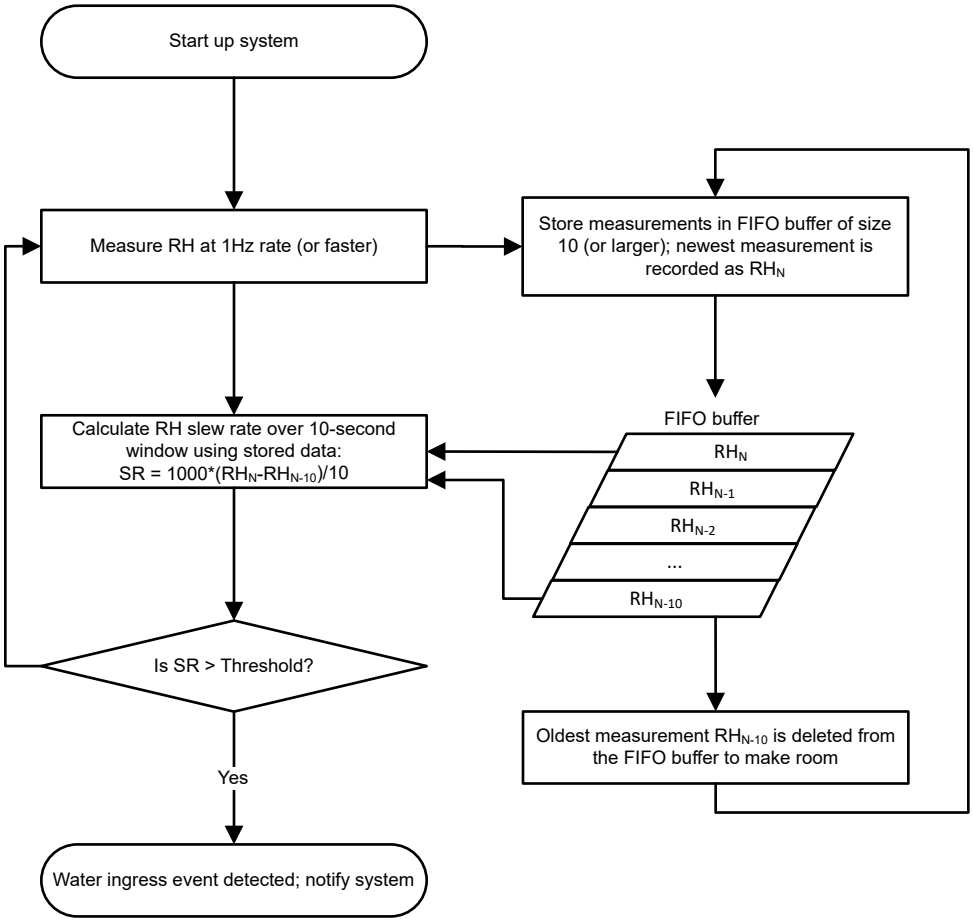

图 4-1. 进水检测算法流程图

需要在软件中设置转换率阈值，以便在测得的转换率超过阈值时发出警报（表明发生了进水事件）。所设计的转换率阈值取决于外壳尺寸和所需灵敏度（必须检测的水量）等因素。根据收集的数据，10m%RH/s 被确定为能在给定 1.7L 外壳中可靠地检测 ≤0.07mL 进水事件的阈值。各种条件下的测试表明，0.07mL 或以上的泄漏事件会导致 RH 迅速上升，且远高于所选阈值，而正常环境湿度波动则始终低于该阈值。可以遵循类似的测试过程来确定不同系统外壳的适当阈值。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

图 4-2 显示了如何基于为测试 2（22°C、45% RH、0.07mL 水）所收集的数据，利用转换率阈值来检测 0.07mL 进水事件。垂直深蓝色线表示进水事件（水被引入测试系统时），水平黑色线表示建议的 10m%RH/s 转换率阈值，垂直浅蓝色线表示进水警报事件（超过阈值时）。下一章节包含多种测试条件下的详细测试结果和数据分析。

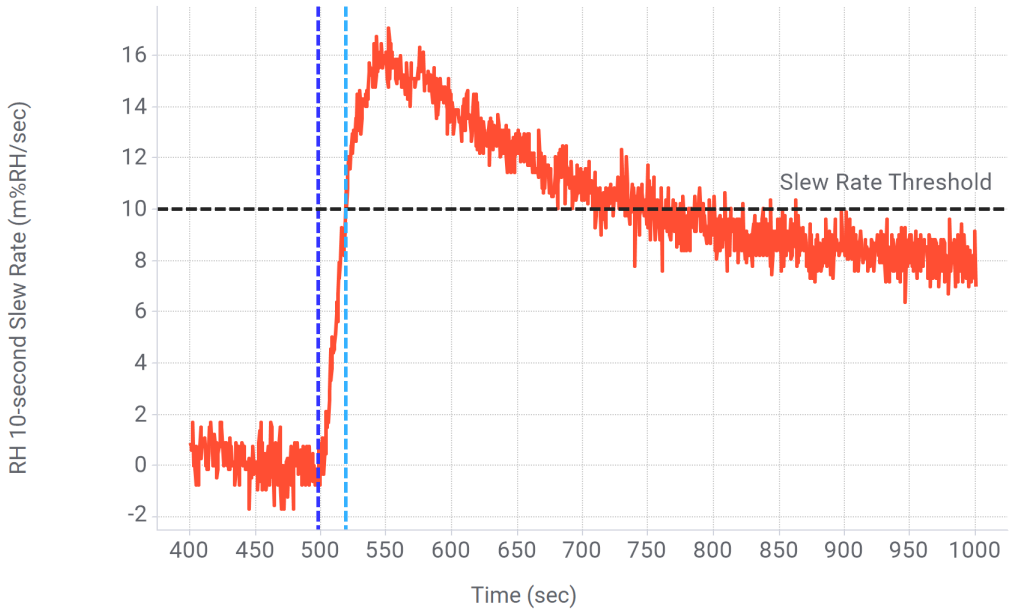

图 4-2. 测试 2（22°C、45%RH、0.07mL 水）：RH 10 秒转换率与时间的关系

5 测试结果

在各种稳态条件下对 HDC3020 湿度传感器的进水响应性能进行了测试，包括不同的环境温度、环境湿度水平和水量。测试结果证实，进水时 RH 会升高，在干燥条件和水量较大的情况下，RH 升高的幅度更大。彻底的数据分析表明，检测给定通风测试外壳进水事件的最可靠方法是查看 10 秒窗口内的 RH 转换率。

5.1 室内环境条件下的测试结果

对于测试 1-3（22°C、45-50%RH）、分析了 1 秒、5 秒和 10 秒等不同时间窗口内的多个数据点，包括相对湿度、绝对湿度、露点、RH 转换率和 AH 转换率。绝对湿度和露点使用以下公式计算得出，其中 AH 代表绝对湿度（以 g/m^3 为单位），T_d 代表露点（以°C 为单位）、RH 代表 HDC3020 相对湿度测量值（以 %RH 为单位）、T 代表 HDC3020 温度测量值（以°C 为单位）。这些方程是根据所设计的气体方程和 Magnus-Tetens 公式推导出来的，其数值采用 Alduchov 和 Eskridge (1996) 所给出的近似值。

$$AH\left(\frac{g}{m^3}\right) = \frac{6.11 \times e\left(\frac{17.625 \times T}{243.04 + T}\right) \times RH \times 2.1674}{273.15 + T} \tag{3}$$

$$T_d\left(°C\right) = \frac{243.04 \times \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17.625 \times T}{243.04 + T}}{17.625 - \ln\left(\frac{RH}{100}\right) - \frac{17.625 \times T}{243.04 + T}} \tag{4}$$

数据分析表明，仅观察 RH、AH 或 T_d 并不能像 RH 转换率那样清晰地指示进水事件。此外，对于半开放系统，设置 RH 或 AH 固定阈值可能会导致误报，因为环境湿度波动也会随着时间的推移而推升 RH。图 5-1 和 图 5-2 显示了测试 2（22°C、45%RH、0.07mL 水）随时间变化的 RH、AH 和 T_d。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

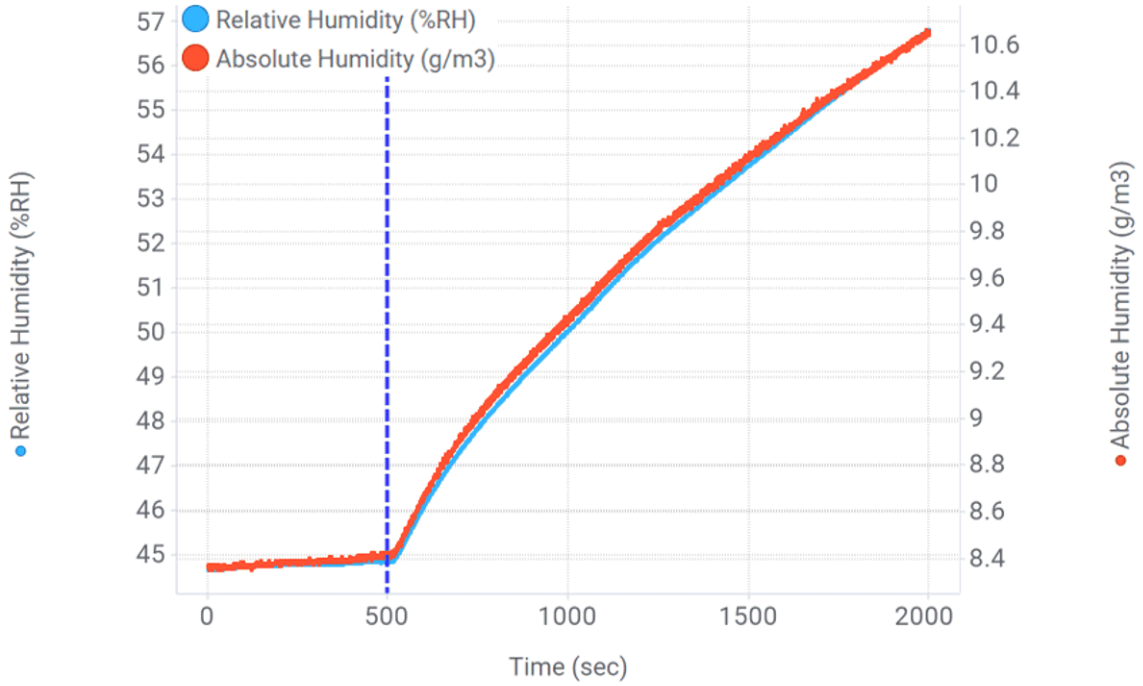

图 5-1. 测试 2（22°C、45%RH、0.07mL 水）：相对湿度和绝对湿度与时间的关系

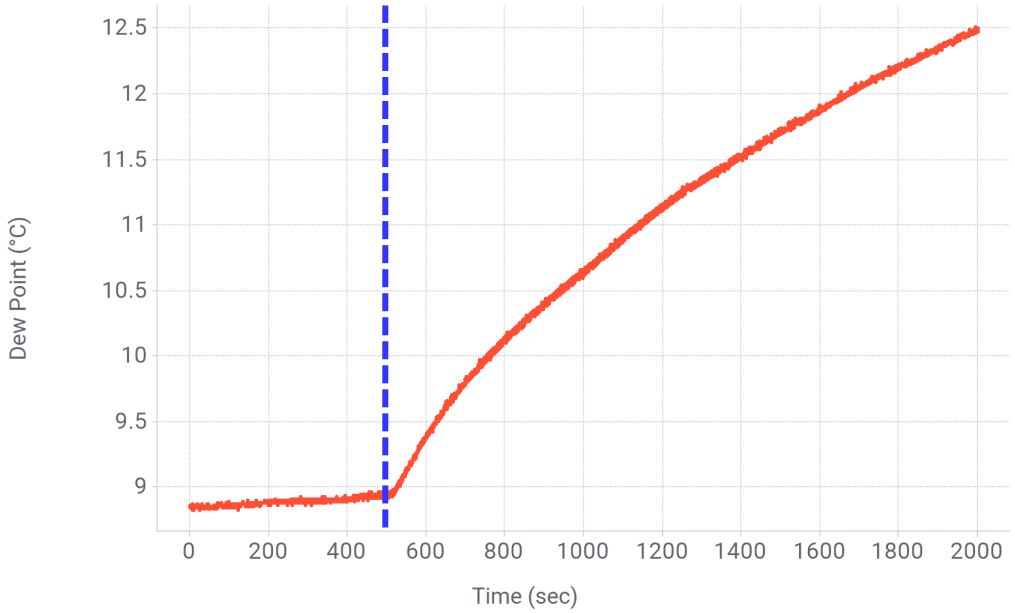

图 5-2. 测试 2（22°C、45%RH、0.07mL 水）：露点与时间的关系

进水事件的最佳指标是 RH 10 秒转换率，尤其是在水量较少的情况下。这是因为 RH 转换率会在电子系统引入水后迅速显著上升（如 图 5-3 所示）。AH 转换率数据噪声太大，无法有效且可靠地指示进水事件（如 图 5-4 所示）。此外，最好使用 5 秒或 10 秒窗口。较小时间窗口中的转换率计算主要由噪声主导，这导致很难区分真正的进水事件（如 图 5-3 和 图 5-4 所示）。使用 10 秒窗口可以消除噪声影响，并将进水事件与正常的湿度波动区分开来。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

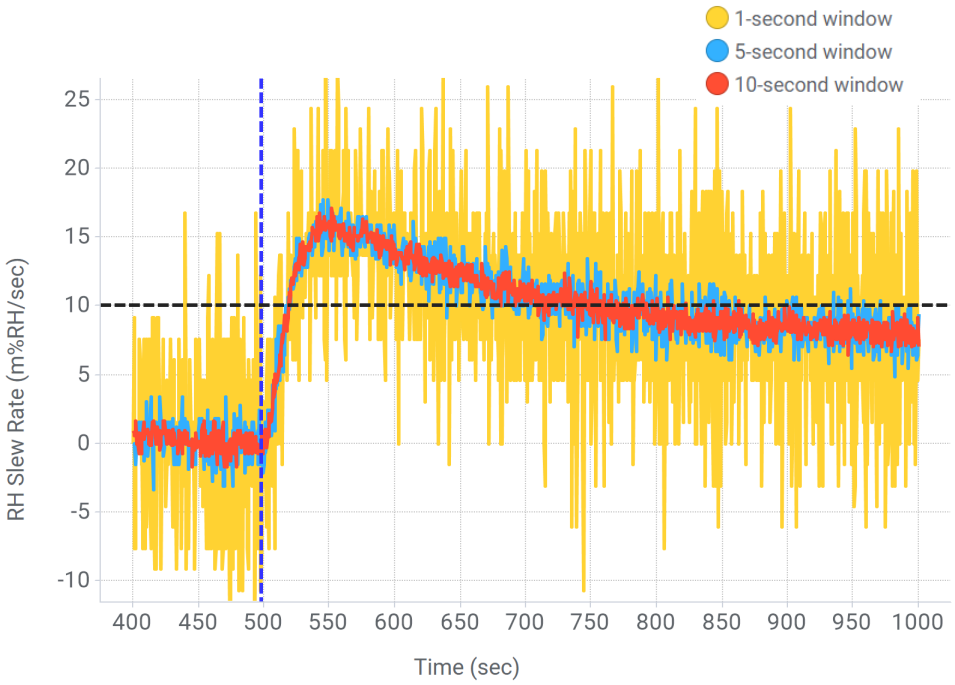

图 5-3. 测试 2（22°C、45%RH、0.07mL 水）：不同时间窗口内计算的 RH 转换率

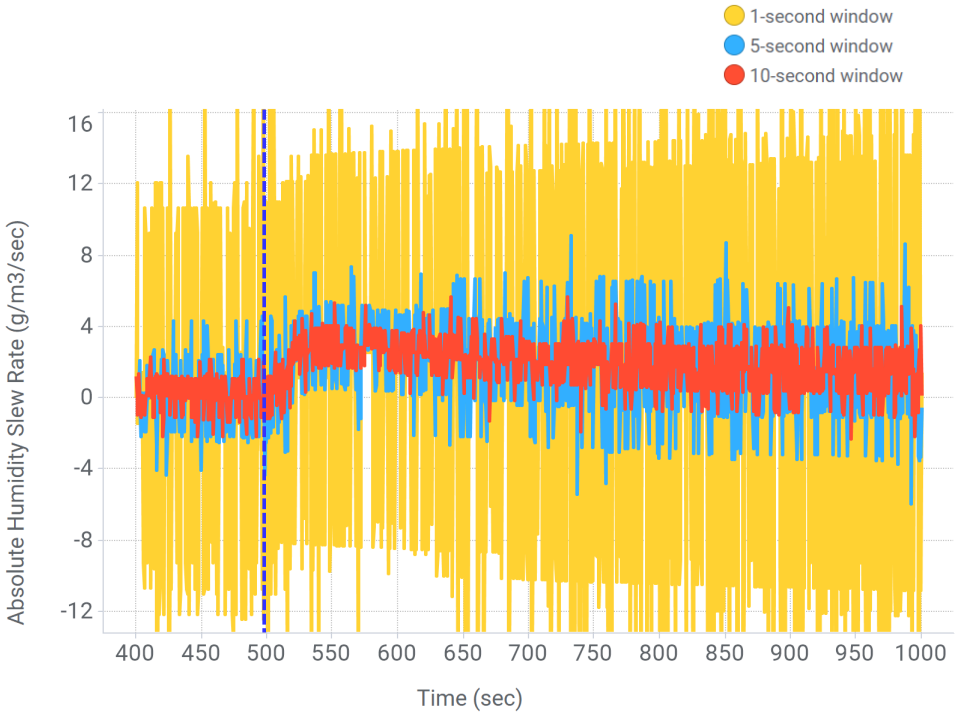

图 5-4. 测试 2（22°C、45%RH、0.07mL 水）：不同时间窗口内计算的 AH 转换率

此外，测试结果证实，水量越大，RH 的变化就越大，从而导致峰值 RH 转换率也越大。图 5-5 和 图 5-6 比较了室内环境条件下所有 3 次水容量测试的响应情况，其中进水事件已标准化为在时间为 0 时发生。使用 RH 10 秒转换率可以轻松区分全流量 (100mL) 和 3 滴 (0.07mL) 事件。1 滴 (0.023mL) 事件的 RH 转换率也显著上升，但数据噪声更大。因此，使用 RH 转换率阈值很难可靠地区分 1 滴进水事件和正常的环境湿度波动（如 图 5-6 所示）。这表明，转换率阈值可用于检测 ≤0.07mL 的少量进水，但在检测更小的水量方面可能存在局限。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

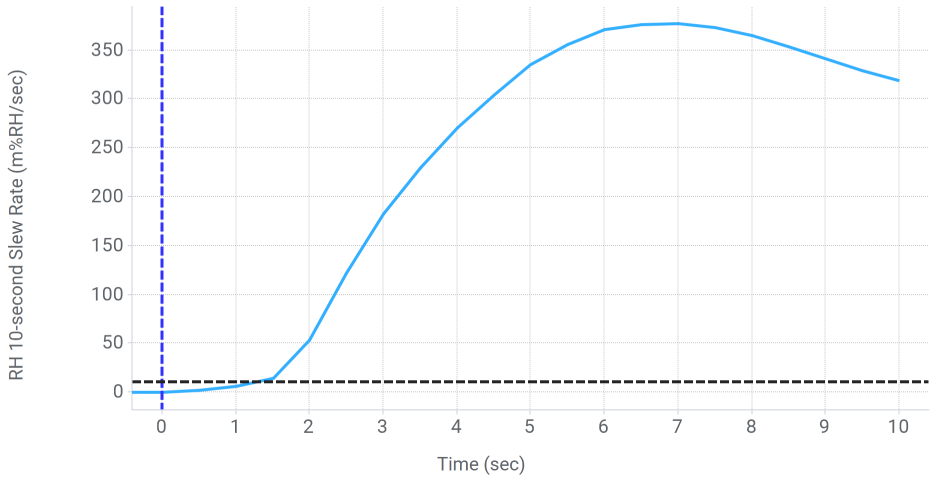

图 5-5. 测试 3（22°C、50%RH）、全流量 (100mL) 测试

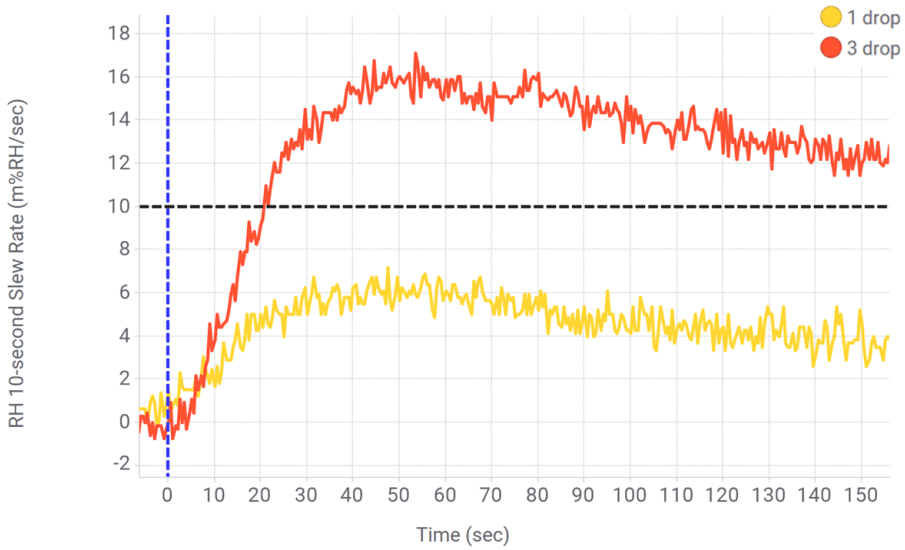

图 5-6. 测试 1-2（22°C、45%RH）、1 滴 (0.023mL) 和 3 滴 (0.07mL) 测试

在室内环境温度和 70%RH 湿度水平条件下也发生了全流量进水事件。图 5-7 显示了 70%RH 条件下全流量进水事件的响应情况，其中进水事件已标准化为在时间为 0 时发生。在 RH 较高的情况下，进水事件导致的 RH 转换率变化不太明显，但仍然轻松超过了 10m%RH/s 阈值，因此可与典型的环境波动区分开来。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

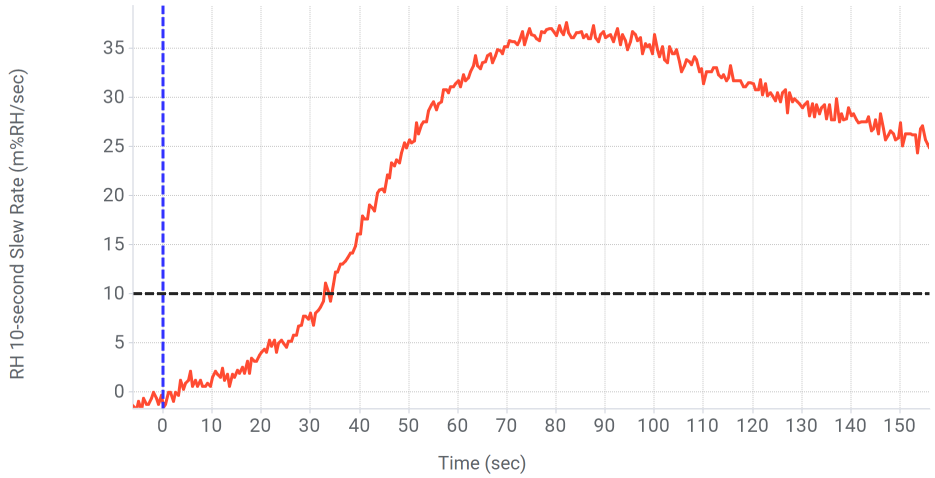

图 5-7. 测试 4（22°C、70%RH）、全流量 (100mL) 测试

5.2 高温和低温条件下的测试结果

接下来，对 HDC3020 进行了过热测试，以确保 HDC3020 能够可靠地检测少量进水。在研究了不同条件下的三滴测试数据后，选用 10m%RH/s 的转换率阈值来检测给定测试外壳的进水事件。

表 5-1 和 图 5-8 列出了所有温度和湿度条件下的三滴测试结果。在所有情况下，进水事件都能在 40 秒内检测到，而在大多数情况下可在几秒内检测到。如图所示，与更潮湿的初始条件相比，更干燥条件下产生的峰值 RH 转换率要高得多（在寒冷干燥空气中可达 106.0m%RH/s）。更干燥的条件也允许更快地检测到进水事件，在炎热干燥空气中的检测速度最快可达 1.5 秒（使用 2Hz 的自动测量速率）。低温条件下的峰值转换率高于高温条件下的峰值转化率；例如，比较低温或潮湿和高温或潮湿测试结果。这种行为的原因可解释为在低温条件下，平衡饱和蒸汽压较低，因此环境的水分含量较低，水分含量的微小变化会导致较大的 RH 值变化。即使在最恶劣的高温和潮湿测试条件下，由进水事件引起的湿度峰值 (22.6m%RH/s) 也远高于 10m%RH/s 的阈值。这证实了所选阈值在各种实际环境条件下都是适用的。

表 5-1. 所有测试条件下的三滴 (0.07mL) 测试总结

测试条件	峰值 RH 10 秒转换率	检测到进水所需的时间 ΔTime
22°C、45%RH（室内环境）	17.1m%RH/s	21.0s
50°C、20%RH（高温干燥）	78.1m%RH/s	1.5s
50°C、70%RH（高温潮湿）	22.6m%RH/s	38.5s
10°C、10% RH（低温干燥）	106.0m%RH/s	3.5s
10°C、70%RH（低温潮湿）	96.4m%RH/s	3.5s

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

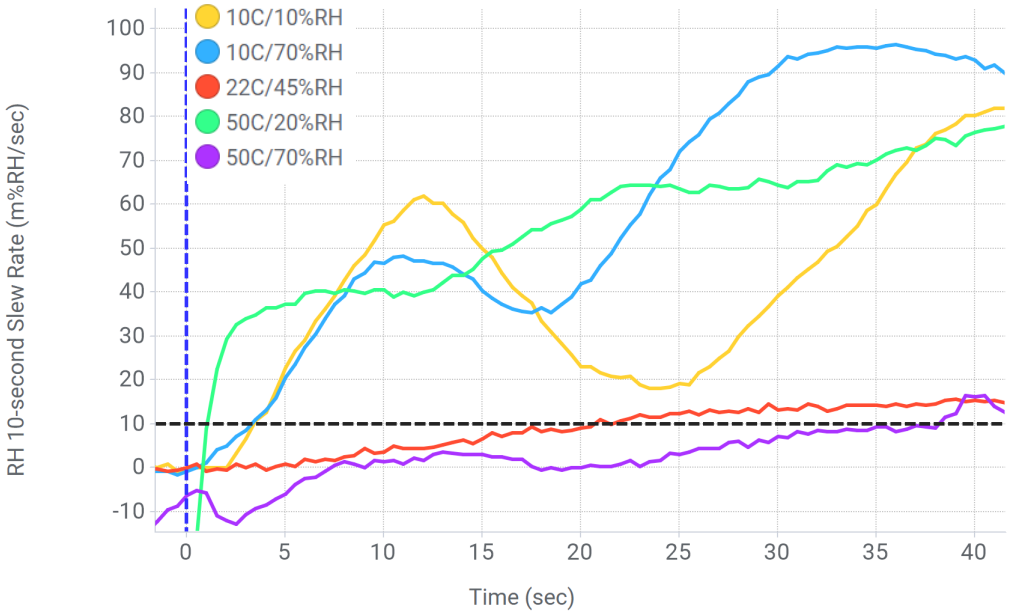

图 5-8. 所有测试条件下的三滴 (0.07mL) 测试

5.3 通风口浸没和空气交换测试

对通风测试外壳进行了额外测试，以确保 RH 变化能可靠地归因于真实的进水事件，并且不会因环境湿度的正常波动而产生误报。首先，将该通风口浸入水中，以验证防水通风口的完整性。通风口阻止了任何水进入测试外壳，并减缓了水分交换速度。因此，RH 基本保持平坦（参阅 图 5-9）。

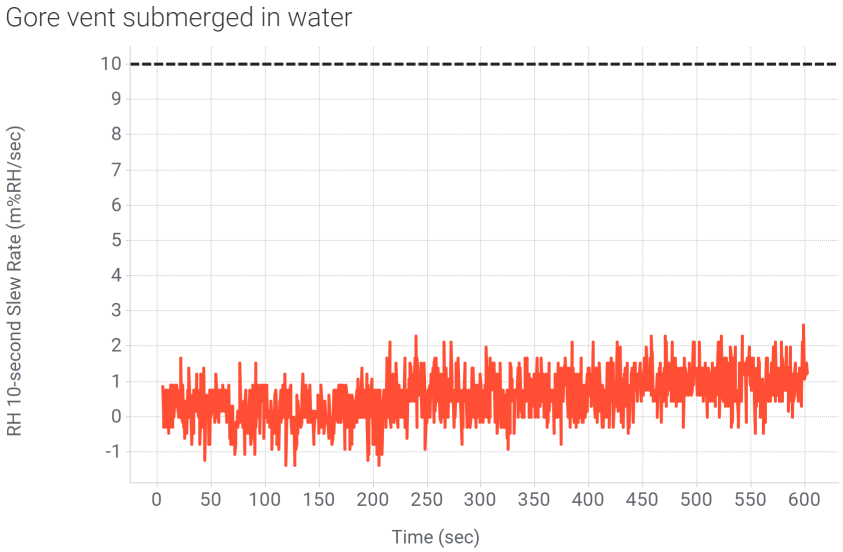

图 5-9. 通风口浸没测试：RH 10 秒转换率与时间的关系

在第二次测试中，通风外壳适应了约 23.5°C 和 44%RH 的室内环境条件。然后，外壳被关闭并放置在环境测试箱中，该测试箱被预设为 25°C 和 90%RH 的高湿度条件。观察 HDC3020，以了解 RH 读数升高的速度。如 图 5-10 所示，RH 10 秒转换率随着时间的推移没有像真正的进水事件那样快快速上升，而且始终远低于阈值。这表明，如果外壳适当通风，就可以在不触发误报的情况下将泄漏与正常湿度上升区分开来。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

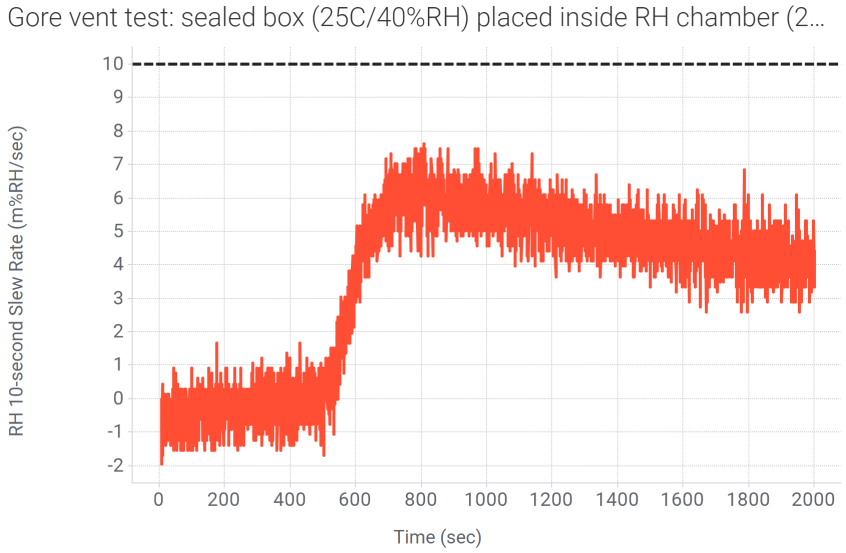

图 5-10. 通气外壳与环境箱之间的空气交换测试：RH 10 秒转换率与时间的关系

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6 总结

使用 HDC3020 等湿度传感器创造了一种基于 RH 转换率检测算法的新的进水和泄漏检测方法。相对湿度急剧上升（以 RH 10 秒转换率测量）表示存在漏水情况。这种方法允许单个传感器通过感应水蒸汽来覆盖整个外壳，无论何处发生泄漏，都能检测到漏水情况。这些结果适用于半开放系统和封闭系统。

在 10 – 50°C 温度和湿度 10 – 70% RH 范围内进行的广泛测试表明，即使少量泄漏（1.7L 外壳中的进水量为 0.07mL）也会触发明显的湿度飙升。使用经测试的 1.7L 外壳、10m%RH/s 的阈值可在 40 秒内可靠地检测到此类泄漏，同时避免因环境湿度变化而产生的误报。该方法在所有测试条件下（包括高温/低温和潮湿/干燥的极端条件）都具有极强的可靠性。这种方法可通过极少的硬件（仅需一个小型湿度传感器和简单的固件逻辑）实现对泄漏和进水情况的早期预警。该方法能检测出外壳内任何位置的进水情况，并能将真正的泄漏与背景湿度变化区分开来，性能优于传统方法。

HDC3x 产品系列（包括 HDC3020-Q1 等汽车级产品）是 TI 的最新一代湿度传感器产品，建议采用这种泄漏检测方法。HDC3020 数字 RH 传感器和 HDC3120 模拟输出 RH 传感器均采用标准开放腔 WSON 封装。此外还有 HDC3021 和 HDC3022 封装型号产品，两者具有与 HDC3020 相同的电气和 RH 性能。值得注意的是，HDC3022 采用 IP67 级 PTFE 滤膜，可保护中心腔免受灰尘和水的侵害。这种水检测算法不仅易于实施，而且可以根据不同的外壳体积和进入系统的预期水量进行调整。确保外壳密封或通风良好可防止环境湿度大幅波动，从而使得由泄漏引起的湿度上升幅度远高于正常的环境变化。测试结果表明，该检测算法可以使用 10m%RH/s 的转换率阈值，但是需要根据特定外壳尺寸的空气量和所需灵敏度（例如必须检测的进水量）的实证评估来调整所设计的阈值。

图 6-1. HDC3x 产品系列封装选项

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*HDC3x 硅器件用户指南*
2. 美国国家气候数据中心，*改进版 Magnus 饱和蒸汽压近似值计算公式*。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款或 ti.com 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司