Application Note

Type-C PD 的液体检测及腐蚀缓解

Katilynn Mar
Raymond Lin

摘要

自 USB Type-C® 和电力输送推出以来，许多应用都采用这种普遍接受的连接器作为主 USB 接口。蓝牙扬声器、电动自行车及电动工具等便携式 USB Type-C 应用更有可能受到将碎屑或液体引入 USB Type-C 连接器的环境影响。这会导致连接器引脚之间出现不必要的短路，进而会加速 USB Type-C 连接器的腐蚀速率，从而可能影响连接器的完整性并导致其无法使用。由于 Type-C 连接器存在这些风险，因此必须能够保护系统免受这些意外短路的影响。TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 支持 USB-C PD 液体检测和腐蚀缓解功能，可在检测到液体时保护系统和 USB Type-C 连接器免受腐蚀。本应用手册介绍了 TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 液体检测特性的硬件及固件实现。

内容

1 简介.....2
1.1 什么是液体检测，为什么需要它？.....2
1.2 定义.....3
1.3 液体检测方法概述.....3
2 详细说明.....5
2.1 硬件实现和要求.....5
2.2 固件实施和要求.....6
3 详细应用程序.....12
3.1 示例液体检测配置.....12
3.2 应用性能曲线图.....13
4 总结.....17
5 参考资料.....17

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

1.1 什么是液体检测，为什么需要它？

在连接状态下，VBUS 支持高达 20V (SPR) 或 48V (EPR) 的电压，而 CC 和 VCONN 引脚电压约为 5V。即使在 Unattached.SNK 或 Unattached.SRC 状态下，DRP 电源也会将 CC 线路拉至 3V 至 5V 之间的电压。这会造成连接器引脚腐蚀的风险，最终会损坏 USB 接口和更宽的系统，请参阅图 1-1 中的 Type-C 端口腐蚀性损坏。为了缓解这种情况，USB Type-C® 规范（修订版 2.3）引入了液体检测模式。该标准要求器件转换至 0V 状态以防止腐蚀。

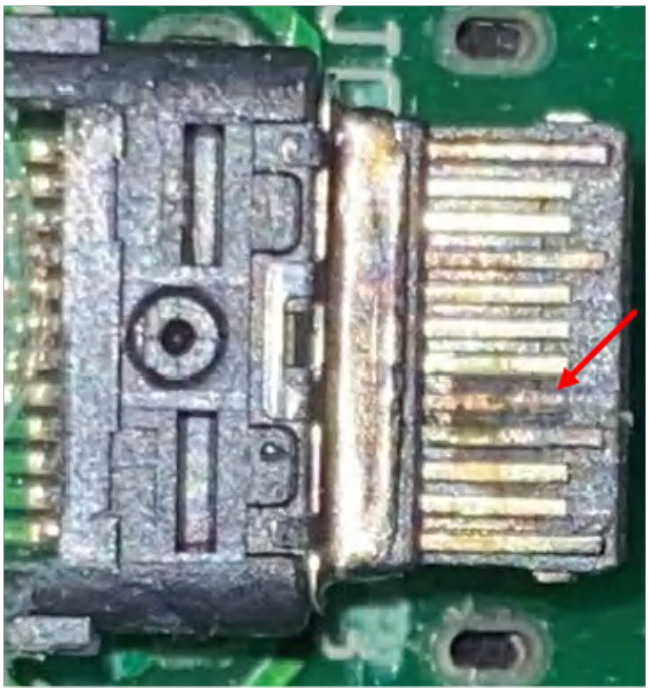


图 1-1. Type-C 端口腐蚀

在 attached.SNK 或 attached.SRC 状态下，VBUS 引脚支持高达 20V 的 SPR 和最大 48V 的 EPR，并且 CC 和 Vconn 引脚最高可支持约 5V 的电压。即使在 unattached.SNK 或 unattached.SRC 状态下，仅供电方或 DRP USB Type-C 连接器也会将 CC 线路上拉至 3V 至 5V。在这些状态下，如果连接器引脚短路，VBUS 电压电平最终会导致连接器内腐蚀，从而损坏 USB 接口并可能损坏系统。能够防止和减少腐蚀损坏可以延长系统使用寿命。

德州仪器 (TI) 的 TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 器件能够支持 USB Type-C 规范中所述的液体腐蚀缓解方法，以确定 USB Type-C 连接器是否存在短路。该方法使用专用测量引脚测量引脚之间的漏电压，以确定是否存在短路。TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 用超少的外部电路实现了此特性。此功能也可通过 USBCPD 应用程序自定义工具进行自定义。

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1.2 定义

本部分确定了本文档中的一些关键字和定义。基于 USB 电力输送规范修订版 3.2 的定义。

腐蚀缓解	通过将 CC 引脚驱动至接近零的电压电平来降低腐蚀风险，防止在未连接状态期间出现意外的电流流动。
连接状态	器件已通过 CC 引脚检测到有效连接，这意味着已插入电缆和/或伙伴器件，并且在最短去抖时间 (tCCDebounce) 内检测到正确的上拉 (Rp)/下拉 (Rd) 终端。连接后，端口以其角色（供电方或受电方）锁定，并进入 Attached.SRC 或 Attached.SNK 等状态。
未连接状态	在此状态下，端口会主动驱动/监控其 CC 引脚，以*检测*潜在的连接。通常有 Unattached.SNK 和 Unattached.SRC 等子状态，端口根据 CC 上的上拉/下拉电阻器检测，检查其是否应充当供电方或受电方。
进入“检测到液体”状态	该端口会检测监测引脚上是否存在与液体或污染相符的电气行为，因此它会假定存在水/腐蚀性材料。 进入此状态后、端口被归类为*湿润*。
退出“检测到液体”状态	端口会检测到监测引脚超过干燥阈值，例如，监测引脚会恢复为与无液体状态一致的值（表示液体已干燥或排放）。 进入此状态后、端口被归类为*干燥*。

1.3 液体检测方法概述

TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 使用连接器上的引脚作为测量引脚，并在采集测量样本时在接地 (0V) 和 3.3V 之间切换已知偏置电平。

此功能将使用 SBU1/SBU2、CC1/CC2 或 Dp/Dm 对。用户根据系统的具体检测要求来确定测量引脚。有关根据设计注意事项选择监视引脚的详细信息，请参见硬件实现和要求。

当测量线路偏置为 3.3V 时，PD 控制器会监测是否存在接地短路 (0V)。相反，当线路偏置到地时，PD 控制器会监控连接器上是否存在对任何较高电压引脚的短路。这种双偏置方法可以确保检测测量线路和 VBUS 或其他有效引脚之间的任何意外短路。

PD 控制器成功加载配置捆绑包后，会将样本测量值与阈值进行比较，以确保不会发生不必要的短路。如果发生短路并且超过了高阈值或低阈值，PD 控制器将进入液体检测状态。如果启用了腐蚀缓解功能，则电源路径被禁用，这反过来会移除 VBUS 电压，并且 CC 线路设置为开路。PD 控制器继续对测量线路上的电压读数进行采样，以确定是否仍然存在短路。当电压读数超过无液体状态时，PD 控制器将退出检测到液体状态。

有关 CC 线路和 SBU 引脚/未使用引脚实现的流程图，请分别参阅图 1-2 和图 1-3。

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

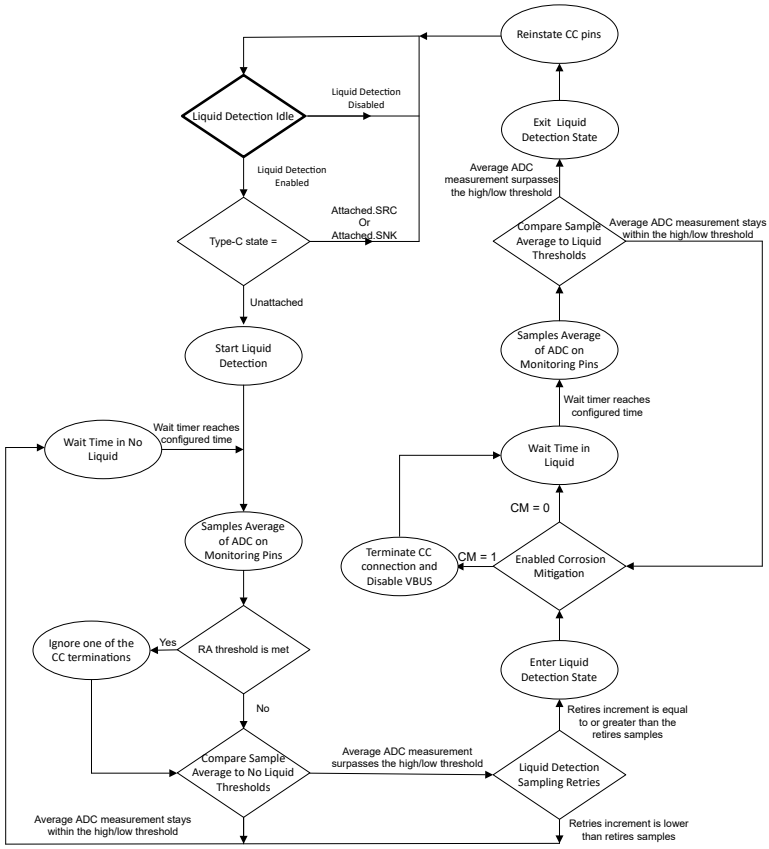


图 1-2. CC 引脚流程图

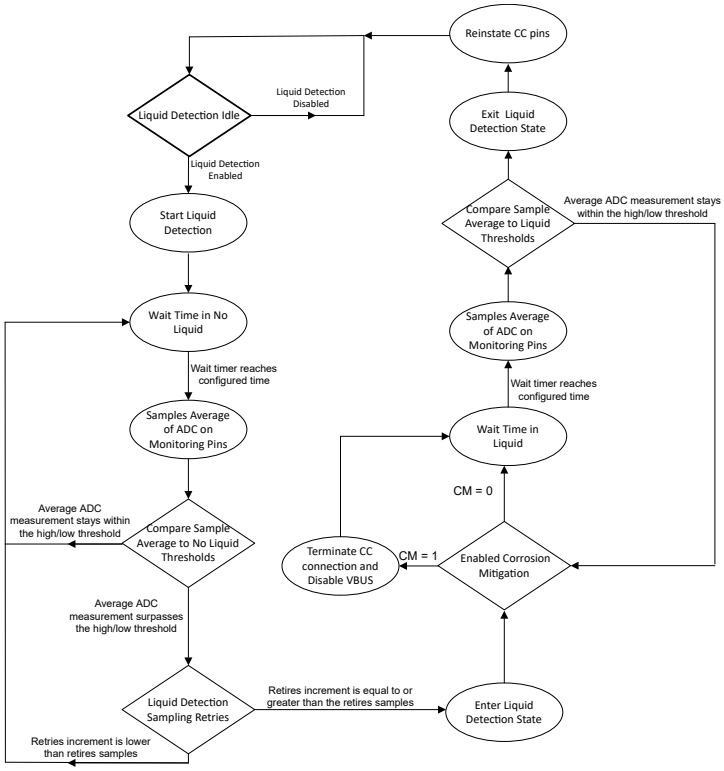


图 1-3. SBU 引脚/未使用引脚流程图

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 详细说明

2.1 硬件实现和要求

CC 引脚或任何未使用的引脚（例如 SBU 或者 Dp/Dm 引脚）将用作 USB Type-C 连接器上的测量引脚。

TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 不支持交替模式（例如 DisplayPort、Thunderbolt 等），因此 SBU 引脚是测量引脚的常见选择。SBU 引脚靠近 USB Type-C 连接器的中心，这提供了采样区域以检测 VBUS、CC 和接地短路。SBU 引脚能够支持连接或未连接状态下的液体检测。

CC 线路无法区分 PD 通信信号及液体检测信号。因此，只有当 CC 引脚处于 unattached.SNK 或 unattached.SRC 状态时，才能可靠实现液体检测。为避免干扰，仅当不存在有效 PD 连接时，才能使用 CC1 和 CC2 线路进行采样。

选择监控引脚后，这些引脚会从连接器路由到 TPD4S201 或 TPD4S480 以实现过压保护（在 SBU 引脚短接至高于 5V 的情况下），并连接到 PD 控制器的 GPIO0 和 GPIO2。GPIO 引脚的额定电压高达 6V，因此无法承受 VBUS 短路事件。TPS25751A 和 TPS25752A 与 TPD4S201 配对用于 SPR 应用，TPS26750A 与 TPD4S480 配对用于 EPR 应用。

GPIO0 和 GPIO2 引脚用于 ADC 使能配置，利用它们的内置 ADC 功能来测量电压。对于液体检测，需要附加的输出 GPIOx 和输入 GPIOy。此外，GPIOz 引脚可用作可选输出。有关液体检测中所用 GPIO 配置的详细信息，请参阅节 2.2.2。

所需的和可选的 GPIO 均如图 2-1 所示。在这个特定示例中，CC 引脚用于监控，而 SBU 线路保持悬空。有关每个引脚功能的更多详细信息，请参见节 2.1.1。

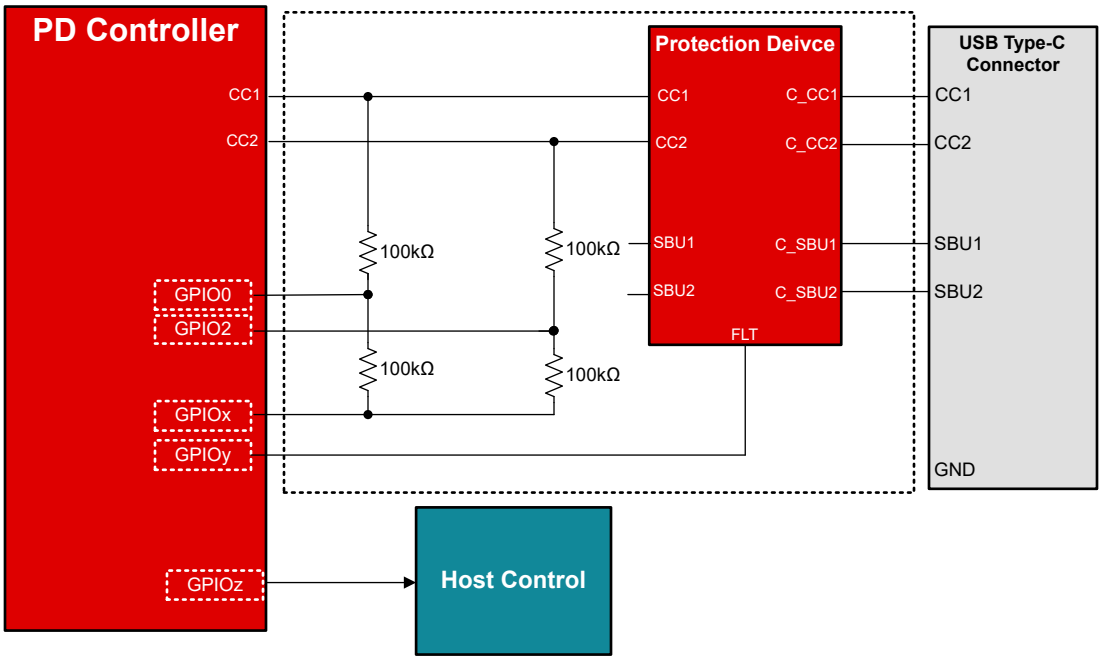


图 2-1. CC 线路硬件实现

2.1.1 GPIO 硬件要求

如图 2-1 所示，GPIOx 用于控制监测引脚上的偏置电压。GPIOx 通过电阻器连接到 GPIO0 及 GPIO2。测量引脚采样中使用的电阻器的建议最小电阻为 100kΩ。

GPIOy 是保护器件到 PD 控制器的输入事件。在 GUI 配置工具中，GPIOy 引脚必须映射到 GPIO 映射事件字段中的故障输入事件 (33)。当输入信号被置为高电平时，PD 控制器将进入 ErrorRecovery 模式并禁用 VBUS 电源。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

在图 2-2 中，GPIOx 是 GPIO7，GPIOy 是 GPIO1。

可选的 GPIOz 可用于在器件进入或退出“检测到液体”状态时通知主机器件。将 GUI 工具配置为 PD 控制器上任何未使用的 GPIO，并在“GPIO 映射事件”字段中将 GPIOz 引脚分配给“液体检测”事件 (157)。建议将 10kΩ 上拉电阻器连接至 LDO_3V3。

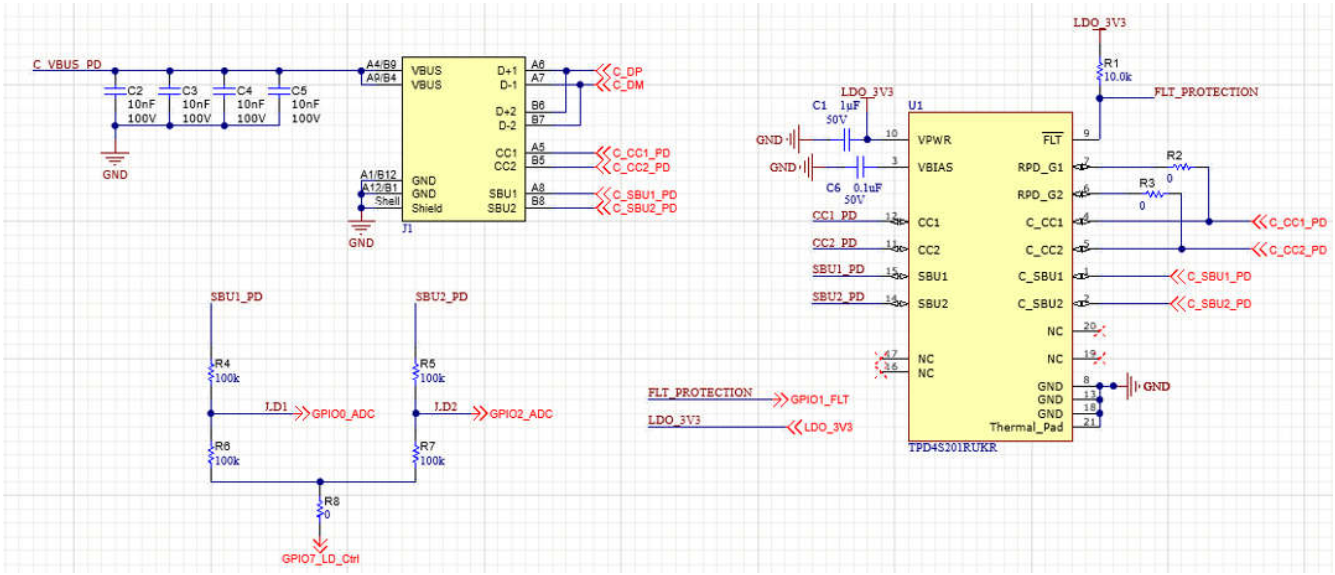


图 2-2. *使用 TPS25751A 及 TPD4S201 的液体检测示例原理图*

2.2 固件实施和要求

借助 USB-C PD 应用程序自定义工具，用户可以配置液体检测参数，包括样本数、时序和阈值电压范围。请注意，该工具的默认设置可能无法与所有应用要求保持一致；用户应查看各个寄存器描述，以确保针对其特定系统优化配置。

2.2.1 I2C1 的中断事件/屏蔽/清除（寄存器 0x14/0x16/0x18）

中断事件/屏蔽/清除寄存器适用于具备外部微控制器与 PD 交互的系统。中断屏蔽通过 USBCPD 应用程序自定义工具进行初始化和配置。

当检测到进入或退出液体时，会在状态转换期间触发可选的液体检测中断。检测到短路时，GPIO 引脚上的 ADC 测量值超过“干燥”阈值，表明 USB Type-C 连接器上存在液体。在发生中断事件时，微控制器读取中断事件 (0x14) 寄存器以识别触发器。在所需的响应之后，通过向中断清除 (0x18) 寄存器中的相应位写入“1”来清除事件。为了确保可靠运行，必须通过 USBCPD 应用程序自定义工具配置中断屏蔽，并将其包含在生成的配置文件中。不建议在有效 PD 运行期间修改屏蔽设置，因为它会干扰实时中断事件。

2.2.2 GPIO 配置（寄存器 0x5c）

USBCPD 应用自定义工具用于配置所有 GPIO。GPIO 配置 (0x05) 寄存器允许用户配置 TI PD 控制器的 GPIO 引脚。为了正常进行液体检测操作，需要三个 GPIO，并额外需要一个可选 GPIO 来发出液体检测事件信号。GUI 工具会生成一个配置文件（二进制或 C 数组），然后加载到 PD 控制器。请务必注意，在运行期间无法修改 GPIO。

如图 2-2 所示，GPIO0 和 GPIO2 通过一个电阻器连接到 USB Type-C 连接器的测量引脚，以连接到受保护的测量引脚。这些 GPIO 多路复用为 ADC 功能，以测量监控引脚上的电压。

在 IO 配置 (0x05) 寄存器中，GPIO0 和 GPIO2 都必须

- 将 GPIO Pin[1:0] 字段的多路复用设置为多路复用至 ADC 的引脚*(0x1)*
- *模拟输入控制 [224/226] 字段* 设置为 *ADC 引脚 (0x1)*
- OutputEnable [0/2] 已禁用并保持未选中状态

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

GPIOx（请参阅*图 2-1*）通过 GUI 工具进行配置。TPS25751A、GPIO7 的默认配置设置为 *GPIO 映射事件 [351:344]*[1] 作为 *LIQUID _CONTROL (155)*。

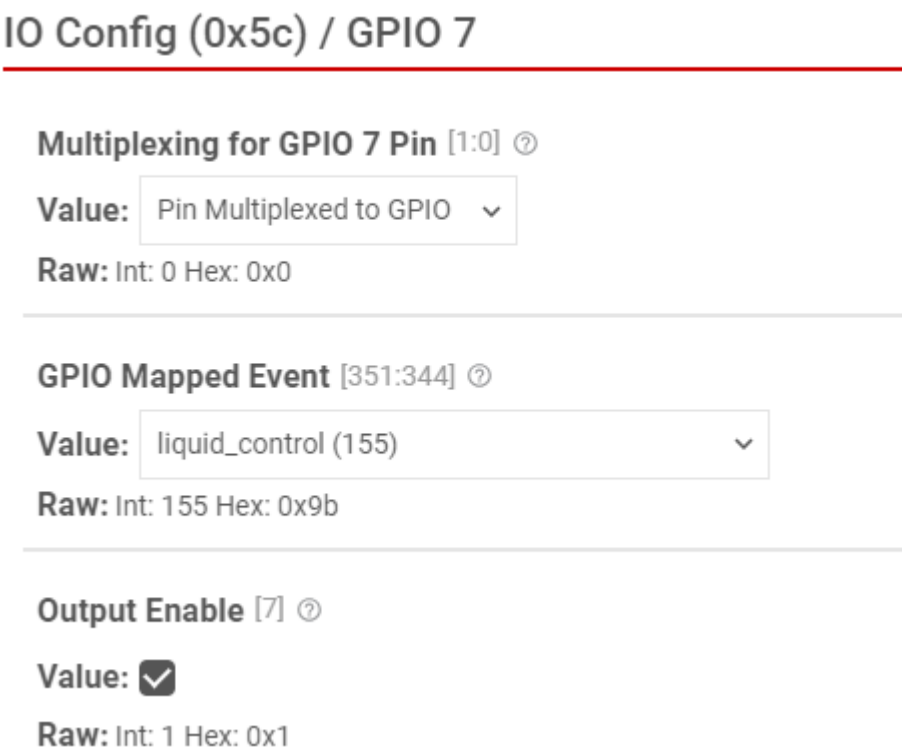


图 2-3. *GPIO7 配置为 liquid_control (155)*

所需的 GPIOy 输入事件 *FAULT_INPUT_EVENT_PORT1 (33)* 与任何可用的 GPIO 引脚相关联。该输入事件信号由保护器件来提供。一旦保护器件上出现故障，就会向输入 GPIOy 发送信号，然后将 PD 控制器发送到 UUSBPD ErrorRecovery 中。

可选的 GPIOz 事件 *LIQUID_DETECTED (157)* 可以连接到任何可用的 GPIO 引脚。如果配置了 GPIOz，当 PD 进入“检测到液体”状态时，它将被驱动为高电平；当 PD 退出检测到液体状态时，它将变为低电平。图 2-3 显

[1] 映射事件的位字段位置因使用哪个 GPIO 而异，事件编号保持不变。

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

示了液体检测 GPIO 事件的 TPS25751A 默认值 GPIO6。这通过将 *GPIO 映射事件[343:336]* [1] 设置为 *LIQUID_DETECTED (157)* 事件并启用和检查“输出启用 [6]”来完成。

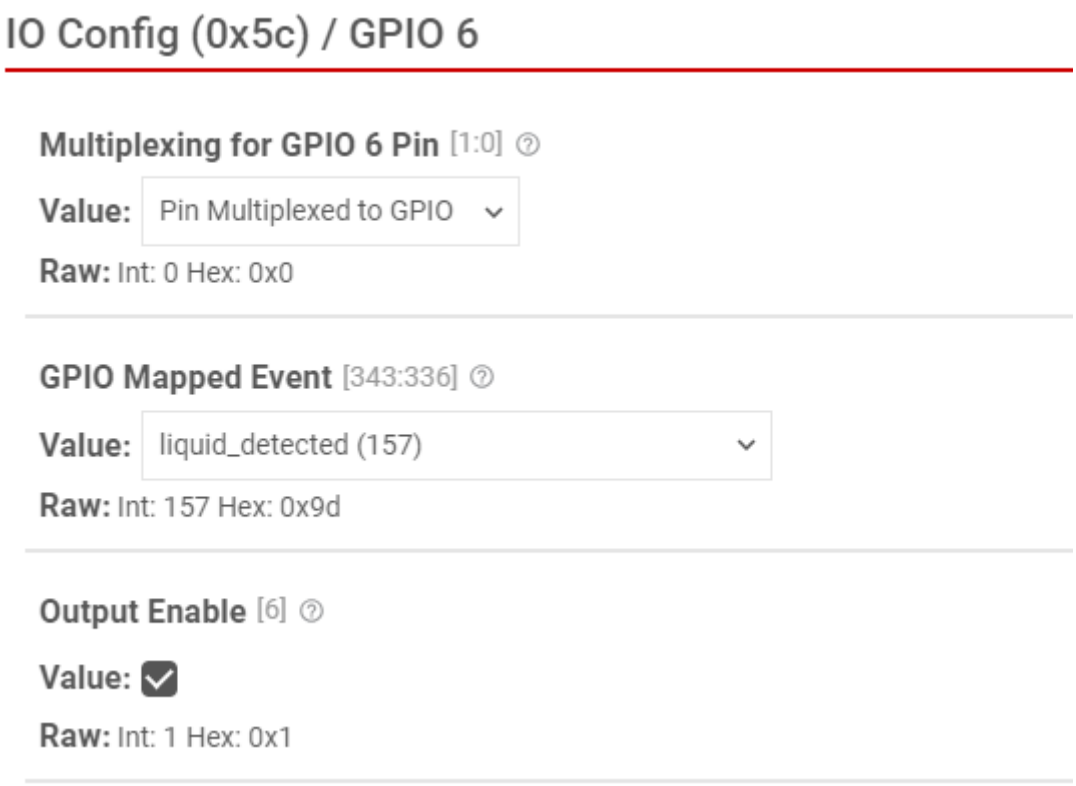


图 2-4. *配置为 liquid_detected (157) 的 GPIO 6*

2.2.3 液体检测配置（寄存器 0x98）

液体检测配置寄存器包含用于液体检测的所有可配置设置，包括-

- 样本数量
- 采样之间的时序
- 进入和退出“液体检测”状态的迟滞范围
- 用于液体检测和腐蚀缓解的使能位
- 用于在 attached.SNK/attached.SRC 状态或 unattached.SNK/unattached.SRC 状态期间监控的启用位

为了启用液体检测功能的默认配置，应用程序定制工具问题的问题 8 必须设置为“是”。要对默认设置执行任何修改，用户需要在 GUI 工具中进入“高级模式”。有关 TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 使用的默认配置设置，请参阅 USBCPD 应用程序自定义工具用户指南表 4-9。

下一部分中讨论的配置设置可在应用程序自定义工具中找到。

2.2.3.1 等待时间

采样间隔定义了湿态与干态下连续测量之间的时间间隔。此延迟可通过“等待时间”字段自定义，以控制 USB Type-C 连接器上转换的时序。等待时间越长，功耗就越低，但根据短路发生的时间和采样发生的时间，可能需要更多的时间才能进入或退出“检测到液体”状态。同样，等待时间越短，PD 就能更快地检测到液体，但功耗会增加。

2.2.3.1.1 无液体时以秒计的等待时间 [7:0]

在干燥状态的等待期间，VBUS 和 CC 线路都保持有效状态以实现正常运行。如图 3-4 所示，观察到大约 4 秒的等待计时器，以管理无液体状态下采样事件之间的间隔。

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2.2.3.1.2 有液体时的等待时间（秒）[15:8]

在处于湿润状态的等待定时器期间，VBUS 和 CC 被禁用（如果启用了*启用腐蚀缓解 81b*），PD 处于液体检测状态。图 3-5，观察到大约 6 秒的等待计时器，以管理无液体状态下采样事件之间的间隔。

2.2.3.2 采样计时和退休

采样时间字段可为用于在 ADC GPIO 引脚上采集液体检测测量值的切换信号提供可定制的时序间隔。单个采样周期由 ADC 线路上的两个方波组成，请参见图 3-1 中的一个采样周期。为了准确表征液体检测状态，需要使用这个完整的脉冲序列。增加采样时间有助于电压读数稳定，从而可以得到更精确的测量结果，但采样间隔需要更长时间才能完成。同样，较短的采样时间可以加快采样间隔，但如果电压尚未完全稳定，则可能得到不太准确的测量值。采样时序必须与样本数一并考虑。

超过无液体阈值后，重试字段将立即激活。这使得 PD 控制器能够在测量引脚上对 ADC 结果重新采样，以确认短路在定义的持续时间内持续存在。如果短路是瞬态事件，而不是真正的液体检测，重试机制会在转换到“检测到液体”状态之前验证是否存在液体，从而防止误报。

2.2.3.2.1 10Ms 内无液体的采样时间 [19:16]

PD 控制器在 GPIOx 转换后实现稳定延迟。该延迟使脉冲能够稳定，并补偿硬件实现的 RC 时间常数。“干燥”条件下的高电平和低电平脉冲都需要此稳定时间，以防止器件转换到下一个状态之前出现错误检测。图 3-2，在无液体状态下观察到样品大约 50ms。

2.2.3.2.2 有无液体时的采样时间 (10ms) [23:20]

PD 控制器在 GPIOx 转换后实现稳定延迟。该延迟使脉冲能够稳定，并补偿硬件实现的 RC 时间常数。“湿润”条件下的高电平和低电平脉冲都需要此稳定时间，以防止器件转换到下一个状态之前出现错误检测。图 3-3，在无液体状态下观察到样品大约 40ms。

2.2.3.2.3 液体检测重试等待时间 [27:24]

液体检测重试等待时间的功能与等待时间字段类似，但特别在重试采样期间适用。这样可以实现比标准采样间隔更短的确认周期，从而加快向“检测到液体”状态的转换。图 3-6 显示了重试机制中的等待时间不同，因此可以减少采样之间的等待时间。

2.2.3.2.4 液体检测重试 [31:28]

液体检测重试次数字段指定进入液体检测状态之前所需的确认循环次数。重试计数控制有多少个额外的采样周期必须确认是否存在液体。图 3-6 显示，一旦超过高阈值，该器件就会在承诺状态更改之前执行配置的重试次数。这提供了一种特定于用户硬件特性和环境条件的可配置去抖机制。

2.2.3.2.5 样本数 [39:32]

进行高电平测量和低电平测量时所需的样本数。此字段值依据2^n样板。如图 3-1 中所示，监控过程涉及两个采样周期，在检测阶段，在测量线上显示为两个方波。

2.2.3.3 高电平和低电平阈值测量

PD 收集完毕后2^n同时对高阈值和低阈值进行采样时，它会计算高阈值和低阈值的两个平均值，并与设定的高阈值和低阈值进行比较。PD 控制器允许用户配置高电平阈值和低电平阈值，以便进入/退出“检测到液体”状态。高电平测量平均值会与高电平 ADC 阈值进行比较，以确认是否存在任何接地短路。低电平测量平均值会与低电平 ADC 阈值进行比较，以确认是否存在任何对正电压的短路。寄存器字段的高电平/低电平阈值范围为 3.3V 至 0V。

正确设置高和低阈值电压非常重要。如果设置不正确，PD 控制器将错误地检测液体并保持液体检测状态。例如，如果高电平阈值电压设置为 3.0V，但 SBU 线路上的模拟电压（无液体状态）实际上为 2.7V，这将导致 PD 检测错误。在设置高阈值和低阈值时，要考虑硬件（电阻值、电路板阻抗、布局）以及如何将这些测量值与可配置阈值正确对齐。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

在图 2-5 中，在不同值下设置无液体和液体高阈值的图示。对于液体短路事件，电压会被拉至定义的“无液体高阈值”以下。将“无液体”阈值设置为高于“液体”阈值，可确保器件仅在引脚完全干燥后才会退出液体状态。

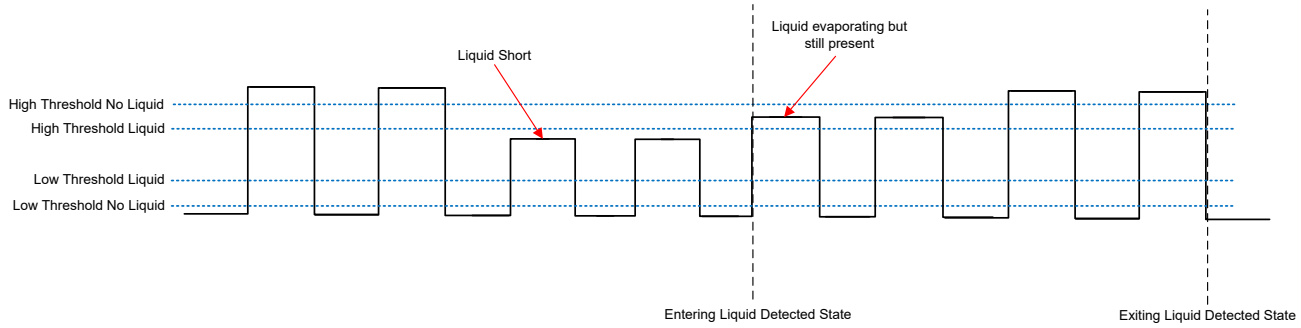


图 2-5. *对用于液体检测的高电平阈值进行区分*

2.2.3.3.1 无液体时的低电平阈值 ADC [47:40]

退出“检测到液体”状态的低电压阈值。PD 使用该值与低电平样本值进行比较，以确定是否存在对正偏置电压引脚的短路情况。该字段必须小于或等于有液体状态的低电平阈值 ADC 字段，否则 PD 无法退出“检测到液体”状态。

2.2.3.3.2 无液体时的高电平阈值 ADC [55:48]

退出“检测到液体”状态的高电压阈值。PD 使用该值与高电平样本值进行比较，以确定是否存在对地电平引脚 (0V) 的短路情况。该字段必须大于或等于有液体状态的高电平阈值 ADC 字段，否则 PD 无法退出“检测到液体”状态。

2.2.3.3.3 有无液体时的低电平阈值 ADC [63:56]

用于进入“检测到液体”状态的低电压阈值。PD 使用该值与低电平样本值进行比较，以确定是否存在对正偏置电压引脚的短路情况。该字段必须大于或等于无液体状态的低电平阈值 ADC 字段，否则 PD 无法进入“检测到液体”状态。

2.2.3.3.4 有无液体时的高电平阈值 ADC [71:64]

进入“检测到液体”状态的高电压阈值。PD 使用该值与高电平样本值进行比较，以确定是否存在对地电平引脚 (0V) 的短路情况。该字段必须小于或等于有液体状态的高电平阈值 ADC 字段，否则 PD 无法进入“检测到液体”状态。

2.2.3.4 启用液体检测 [72]

用于在与 PD 控制器交互的监测引脚上启用液体检测的主控制位。启用液体检测需要适当的外部液体检测电路及配置。当 PD 运行时，外部微控制器可能会动态启用或禁用此功能，对该字段的任何修改只会在下次调用相应的策略时生效。

2.2.3.5 启用腐蚀缓解 [73]

如果启用，PD 会自动处理腐蚀缓解。当检测到液体时，PD 将通过移除 VBUS 并释放 CC 引脚来断开并禁用端口。如果禁用此位，甚至在 USB Type-C 连接器上检测到液体时 PD 会继续正常运行。当 PD 运行时，外部微控制器可能会动态启用或禁用此功能，对该字段的任何修改只会在下次调用相应的策略时生效。图 3-8 展示了禁用腐蚀缓解时的行为，而图 3-6 展示了启用腐蚀缓解时的行为。检测到液体后，VBUS 电源和 CC 信号仍然存在。

2.2.3.6 连接期间监测 [74]

液体检测机制必须支持在连接状态期间进行采样。根据 USB PD 规范，Attached.SRC (或 Attached.Sink) 状态是建立连接后的时间段。通过在此窗口期间启动采样，PD 控制器可以验证监测引脚的完整性，并确保在下一个连接事件发生之前不存在短路。

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2.2.3.7 断开连接期间监测 [75]

液体检测机制必须支持在未连接状态期间进行采样。根据 USB PD 规范，Unattached.SRC（或 Unattached.SNK）状态是连接中断后、建立新连接之前的时间段。通过在此窗口期间启动采样，PD 控制器可以验证监测引脚的完整性，并确保在下一个连接事件发生之前不存在短路。

2.2.3.8 要监测的液体引脚 [77:76]

SBU、CC 或者 Dp/Dm 将用作 USB Type-C 连接器上的测量引脚。TPS25751A、TPS25752A 和 TPS26750A 不支持交替模式（即 DisplayPort、Thunderbolt 等），因此 SBU 引脚是测量引脚的常见选择。SBU 引脚和 CC 引脚靠近 USB Type-C 连接器的中心，这提供了采样区域以检测 VBUS、CC 和接地短路。SBU 引脚实现支持连接或者未连接状态下的液体检测。

2.2.3.9 下拉阈值 ADC [87:88]

在从未连接状态转换到连接状态期间，PD 控制器会执行最终采样周期以验证是否存在液体。如果使用带有电子标记的电缆，则 CC 线路上存在一个内部 *Ra* 电阻器。在这种情况下，液体检测算法必须在测量窗口期间考虑该 *Ra* 电阻。为了避免错误检测，控制器会将 CC1 和 CC2 的测量阻抗与低阈值、高阈值和下拉阈值进行比较。如果满足 Ra 阈值，PD 控制器将忽略来自 CC 线路的 Ra 测量值，并查看相反的 CC 线路测量值以与低阈值和高阈值进行比较。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 详细应用程序

应用手册的本部分重点介绍了使用 TPS25751AEVM 进行液体检测的常见测试用例。

3.1 示例液体检测配置

表 3-1 用于演示目的，与默认器件设置略有不同。除非在波形之前的描述中另有说明，否则节 3.2 中发现的示例波形将与下面描述的配置对齐。

表 3-1. 示例液体检测配置

寄存器	字段名称	示例值
IO 配置 (0x5c)	GPIO AI 启用 GPIO 0 [224]	引脚至 ADC (0x1)
	GPIO AI 启用 GPIO 2 [226]	引脚至 ADC (0x1)
	GPIO 6 映射事件 [343:336]	liquid_detected (157)
	GPIO 7 映射事件 [351:344]	liquid_control (155)
液体检测配置 (0x98)	无液体时的等待时间（秒）	4000ms
	有液体时的等待时间（秒）	6000ms
	无液体时的采样时间 (10ms)	50ms
	有无液体时的采样时间 (10ms)	40ms
	液体检测重试等待时间	500ms
	液体检测重试	3
	样本数量	2
	无液体时的低电平阈值 ADC	504mV
	无液体时的高电平阈值 ADC	2002mV
	启用液体检测	启用
	启用腐蚀缓解	启用
	连接/断开期间监测	启用
	要监测的液体引脚	SBU
	单引脚监控	禁用
	下拉阈值 ADC	0mV

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3.2 应用性能曲线图

以下部分提供了 Saleae 逻辑分析仪波形捕获结果。这些布线旨在根据示例液体检测配置说明预期的信号转换、时序行为和电源路径转换。在以下波形中，使用电阻短接至 GND 来仿真液体。

3.2.1 波形样本数

样本数量示例在表 3-1 中定义；有关样本数量的说明，请参阅节 2.2.3.2.5[39:32]。

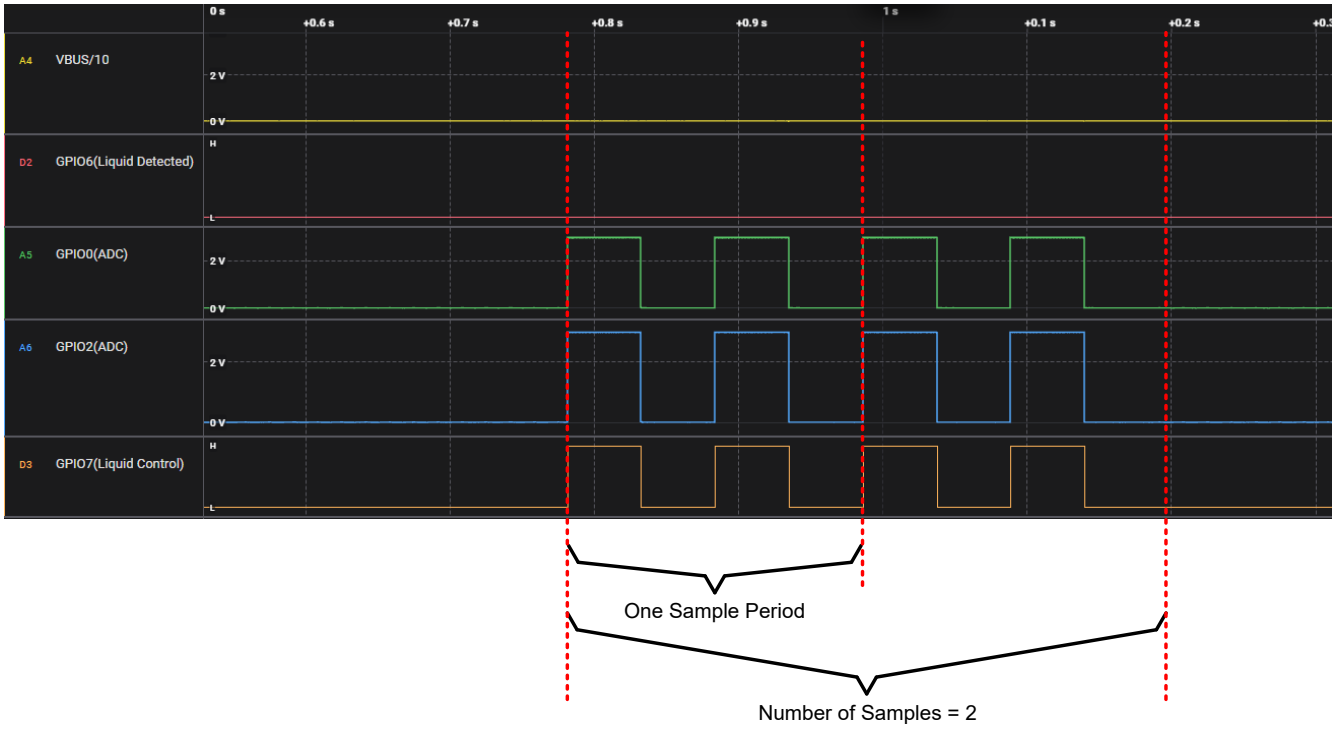


图 3-1. 波形样本数

3.2.2 无液体波形中的采样时间

在表 3-1 中定义了无液体示例配置中的采样时间；有关 10ms 内无液体采样时间的说明，请参阅节 2.2.3.2.1[19:16]。

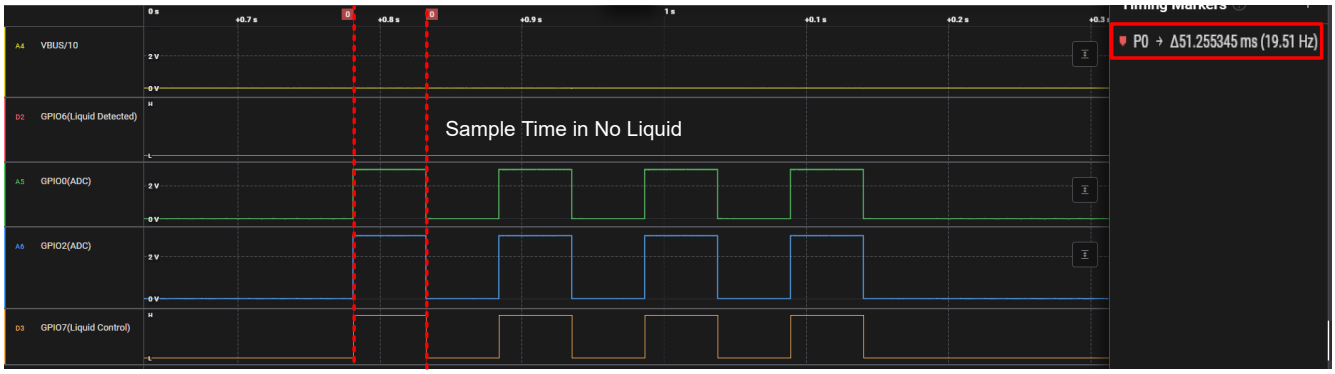


图 3-2. 无液体波形中的采样时间

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3.2.3 液体波形中的采样时间

在表 3-1 中定义了液体示例配置中的采样时间；有关 10ms 内无液体采样时间的说明，请参阅节 2.2.3.2.2[23:20]。

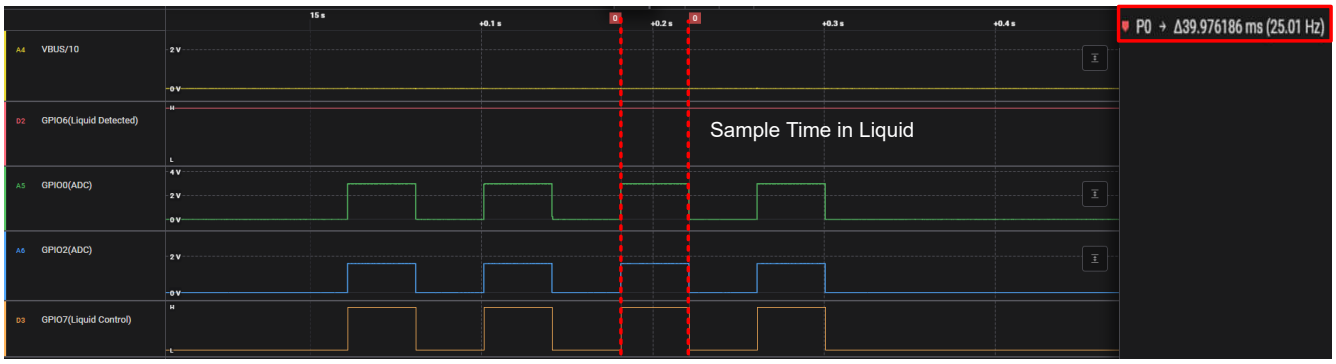


图 3-3. 液体波形中的采样时间

3.2.4 无液体波形中的等待时间

在表 3-1 中定义了无液体示例配置中的等待时间；有关无液体以秒计的等待时间的说明，请参阅节 2.2.3.1.1[7:0]。

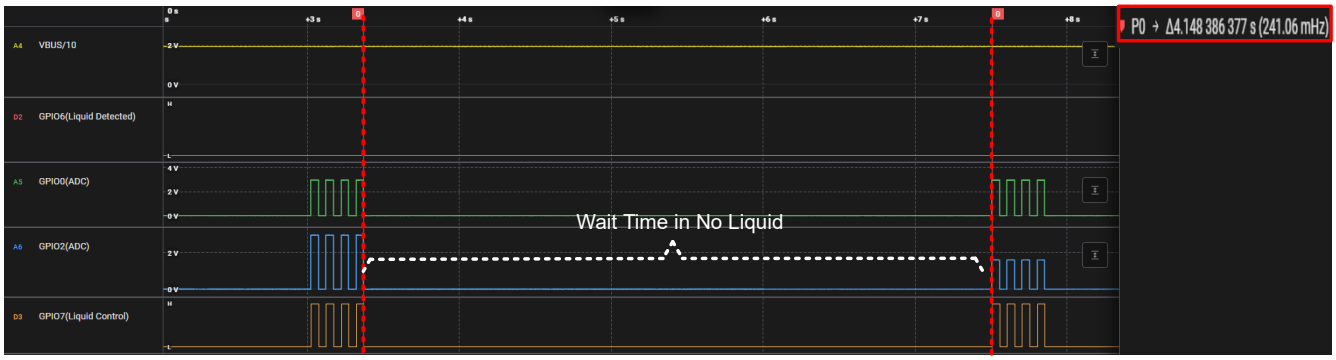


图 3-4. 无液体波形中的等待时间

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3.2.5 液体波形中的等待时间

在表 3-1 中定义了液体示例配置中的等待时间；有关液体以秒计的等待时间的说明，请参阅节 2.2.3.1.2[15:8]。

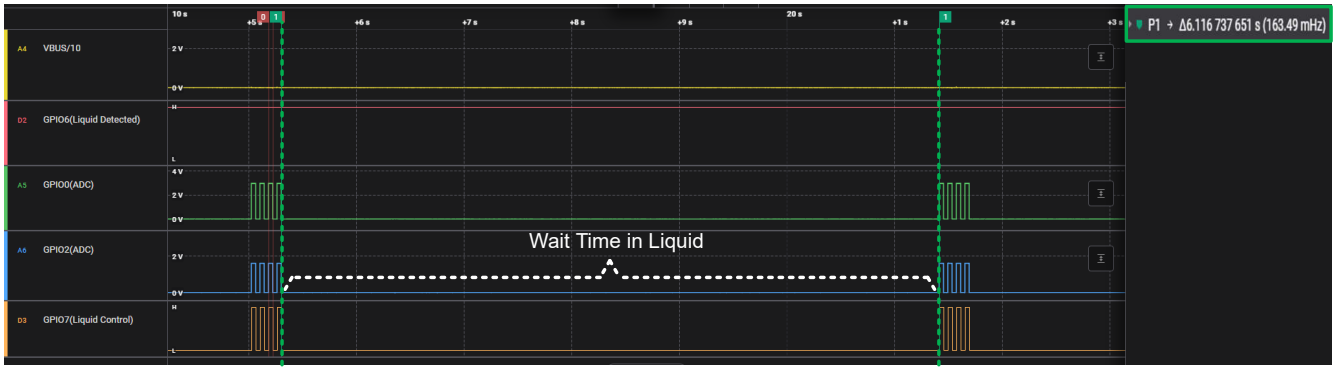


图 3-5. 液体波形中的等待时间

3.2.6 进入液体检测波形

输入液体检测波形会突出显示节 3.1 中定义的许多液体检测配置字段。一旦发生对 GND 短路，GPIO0 高电压读数会被拉至大约 1.8V。超过无液体状态下的高阈值，因此重试采样行为开始。重试采样可确保仍然保持对 GND 的短路。重新绑定采样发生三次，每次采样之间的等待时间为 500ms。一旦退休人员确认短路仍然存在，PD 控制器将进入“检测到液体”状态。有关停用字段的更多信息，请参阅节 2.2.3.2.4，有关停用等待定时器字段的更多信息，请参阅节 2.2.3.2.3。由于启用了腐蚀缓解，请参阅节 2.2.3.5 以了解配置中腐蚀缓解字段的更多信息，VBUS div 10 在进入液体检测状态时被禁用。

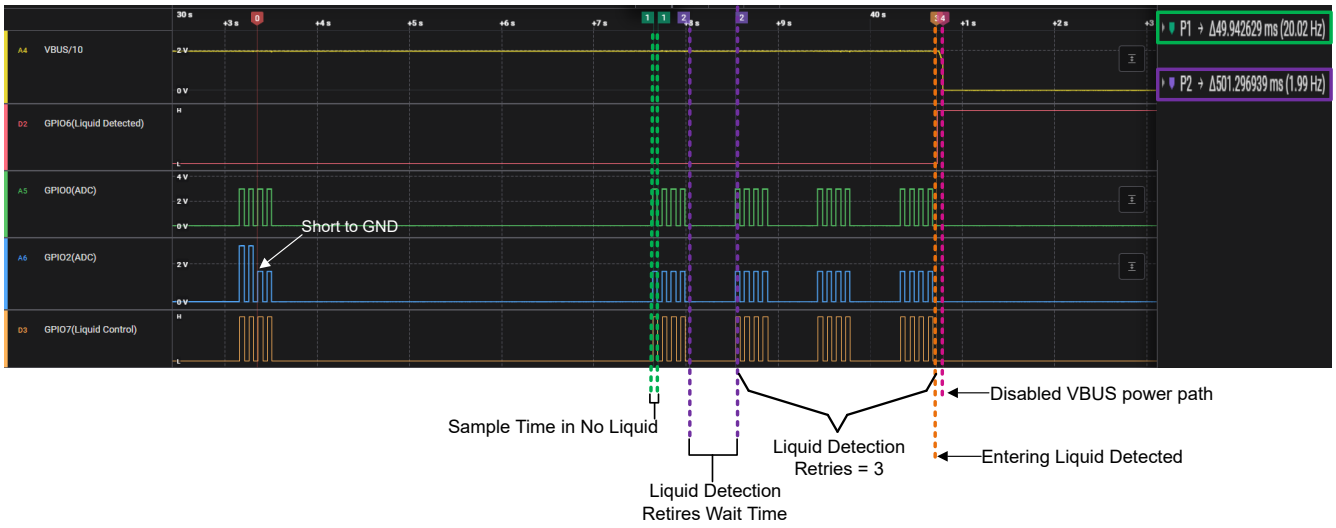


图 3-6. 进入液体检测波形

3.2.7 退出液体检测波形

在退出液体检测波形中，PD 控制器上存在对 GND 短路连接。在液体中的等待时间内，短路会消除。在下一个采样周期时，PD 控制器会看到 ADC 测量值超过高阈值液体设置。PD 控制器会退出“检测到液体”状态，并将“检测到液体”GPIO 置为 LOW。腐蚀缓解功能置为无效，并且 VBUS 电源路径可用。

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

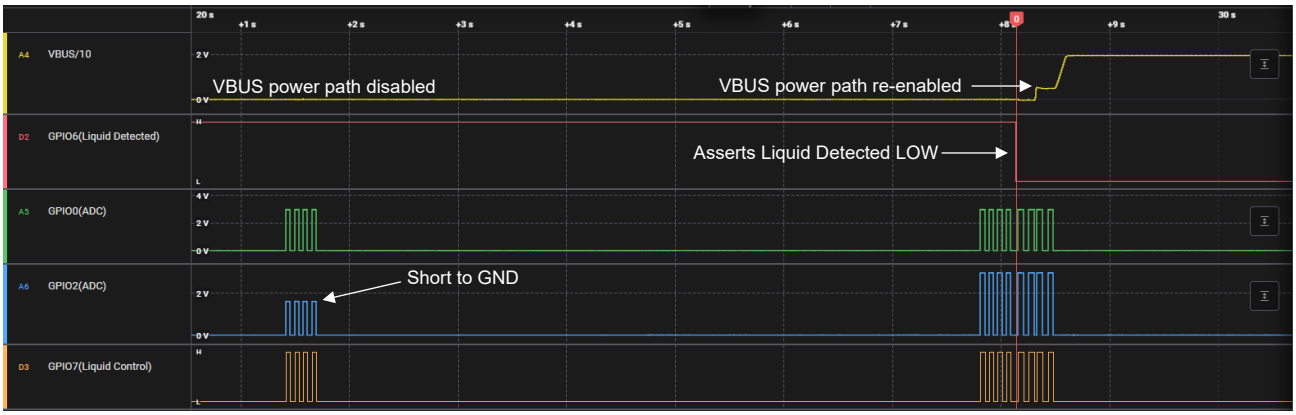


图 3-7. 退出液体检测波形

3.2.8 腐蚀缓解禁用波形

此示例与表 3-1 中所述的配置不同。对于禁用腐蚀缓解波形，腐蚀缓解设置配置为 0，这意味着在进入“检测到液体”状态时，VBUS 电源路径将保持启用状态。此行为反映在以下示例波形中，当检测到液体时，VBUS 电源路径保持不变。

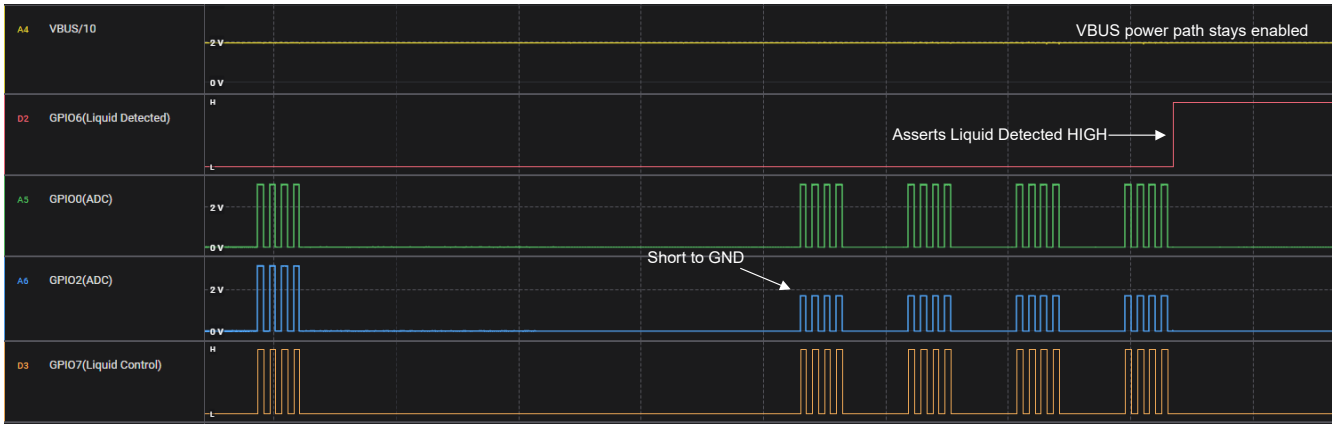


图 3-8. 腐蚀缓解禁用波形

English Document: SDAA491
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 总结

5 参考资料

1. USB Type C，*USB Type-C | USB-IF*，网页。
2. USB 电力输送，*USB 电力输送 | USB-IF*，网页。
3. USB，*USBCPD_Application_Customization_Tool 图库*，网页。
4. 德州仪器 (TI)，*USBCPD 应用程序自定义工具用户指南*，用户指南。
5. 德州仪器 (TI)，*TPS25751A* 产品页面。
6. 德州仪器 (TI)，*TPS25752A* 产品页面。
7. 德州仪器 (TI)，*TPS26750A* 产品页面。

Copyright © 2026 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、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