

如何解决 **PMIC** 在电源电压缓升缓降测试中无法恢复工作问题？



Guohai Lin

摘要

电源电压缓升缓降 (Slow Decrease and Increase of Supply Voltage) 是 ISO 16750-2 中用于模拟蓄电池逐渐放电和充电过程的测试。测试要求对有效输入端以 (0.5 ± 0.1) V/min 的速率 (或步进小于 25mV)，将供电电压由最低工作电压降到 0V，再从 0V 升到最低工作电压。要求设备在这种状况下不损坏，并在供电恢复正常时继续工作。本文将以 TPS650362-Q1 和 TPS65224-Q1 为例，介绍两类 PMIC 在电源电压缓升缓降测试中无法恢复工作的可能原因和解决方案。

内容

1 引言	2
2 输入电压缓升缓降测试导致 PMIC 无法恢复工作的原因	3
2.1 PMIC 的两种输入欠压保护机制 (UVLO)	3
2.2 多次触发 PVIN_B1_UVLO 会导致 PMIC 进入 WT_PWR_REC 状态	3
2.3 输入电压缓升缓降导致 PMIC 进入 WT_PWR_REC 状态的原因	4
3 宽电压输入类的 PMIC 常见解决方案	6
3.1 增大 PVIN_B1_UVLO Rising 和 Falling 之间的差值	6
3.2 用理想二极管代替防反接二极管	6
3.3 TPS650362-Q1 可以使用 Resistive discharge 替代 Active discharge 放电	7
4 低压输入类 PMIC 的常见解决方案	9
4.1 调节一级 BUCK 环路稳定性	9
4.2 避免一级 BUCK 在缓升缓降测试中处于 Dropout 状态	9
5 非功能安全系统可以关闭/屏蔽 RECOV_CNT_THR 来避免进入 SAFE/OFF 状态	11
6 参考文献	12

插图清单

图 2-1. VSYS_UVLO 和 PVIN_B1_UVLO	3
图 2-2. TPS650362-Q1 状态机	4
图 2-3. TPS650362-Q1 缓降测试中多次触发 PVIN_B1_UVLO 导致没有输出	5
图 3-1. TPS650362-Q1 的过冲没有触发 PVIN_B1_UVLO Rising=8.32V	6
图 3-2. 防反接二极管容易导致 PMIC 输入出现过冲	6
图 3-3. 使用理想二极管控制器后过冲消失	7
图 3-4. 反向 Boost 拓扑	7
图 3-5. Active discharge 导致输入电压抬升	8
图 3-6. Resistive discharge 的输入电压不再抬升	8
图 4-1. 一级 BUCK Dropout 状态下输出不稳定，触发 PMIC UVLO	9
图 4-2. 通过 EN 引脚设置一级 BUCK 的 UVLO	10
图 5-1. TPS65219-Q1 MASK_RETRY_COUNT 寄存器	11

1 引言

电源电压缓升缓降 (Slow Decrease and Increase of Supply Voltage) 是 ISO 16750-2 中用于模拟蓄电池逐渐放电和充电过程的测试。测试要求对有效输入端以 (0.5 ± 0.1) V/min 的速率 (或步进小于 25mV)，将供电电压由最低工作电压降到 0V，再从 0V 升到最低工作电压。要求设备在这种状况下不损坏，并在供电恢复正常时继续工作。

TPS650362-Q1 是 TI 面对车载摄像头模组，车载毫米波雷达和安全 MCU 供电等汽车级应用设计的一款 PMIC。它最核心的优势是高度集成，在一个芯片里集成了 3 路 Buck 和 1 路 LDO 等多种拓扑。其中 BUCK2/3 更是支持高达 2.7A 输出电流，输入电压至高可以支持 35V。并配有 I2C 接口和各类监控类寄存器，可以满足高达 ASIL-D 的系统级功能安全要求。TPS650362-Q1 的输入通常应用在电池电源，因此在电源电压缓升缓降中是直接的测试对象。

TPS65224-Q1 是 TI 针对 DMS/OMS 和安全 SOC 系统退出的集成供电方案，提供了多达 4 路 BUCK 和 3 路 LDO 的电源轨，其中 4 路 BUCK 支持灵活组合使用，灵活应对高达 10A 的 SOC 核心电源需求。丰富的监控与控制寄存器，能轻松帮助客户完成系统级 ASIL-D 的设计要求。TPS65224-Q1 通常作为系统中的二级电源轨，并不接触输入电源。但在输入电压缓升缓降测试中，如果前级电源的设计不够完善，也会导致在 PMIC 输入电压上出现异常。

由于 PMIC 通常集成了各类的电源监控功能和保护机制，以帮助系统满足功能安全要求，因此在输入电压缓升缓降测试中会由于输入电压的异常而触发保护机制，导致客户在该测试中无法顺利通过。因此本文主要以

TPS650362-Q1 和 TPS65224-Q1 为例，分别介绍高压输入和低压输入 PMIC 的如何应对由于输入电压缓升缓降测试导致的常见异常状态。

2 输入电压缓升缓降测试导致 PMIC 无法恢复工作的原因

2.1 PMIC 的两种输入欠压保护机制 (UVLO)

以 TPS650362-Q1 为例，PMIC 的电压输入引脚具有一个与 VSYS_UVLO 欠压锁定(UVLO)不同的欠压锁定---PVIN_B1_UVLO。最大的不同在于，PVIN_B1_UVLO 是可编程的欠压阈值，VSYS_UVLO 通常是固定阈值，且 VSYS_UVLO 阈值通常要低于或者等于 PVIN_B1_UVLO 的最低可编程阈值。PVIN_B1_UVLO 可用于在输入电压不超过设定阈值之前保持输出 OFF 状态，但寄存器与错误机制仍然保持 Active 状态，而 VSYS_UVLO 则会将整个 PMIC 完全置于 shutdown 状态。

在输入电压缓升缓降测试中，输入电压会有很长一段时间处于 VSYS_UVLO 与 PVIN_B1_UVLO 阈值附近。如果此时 PMIC 出现错误，且不通过寄存器进行错误清零的话，该错误将会一直被记录，并影响 PMIC 的正常输出。

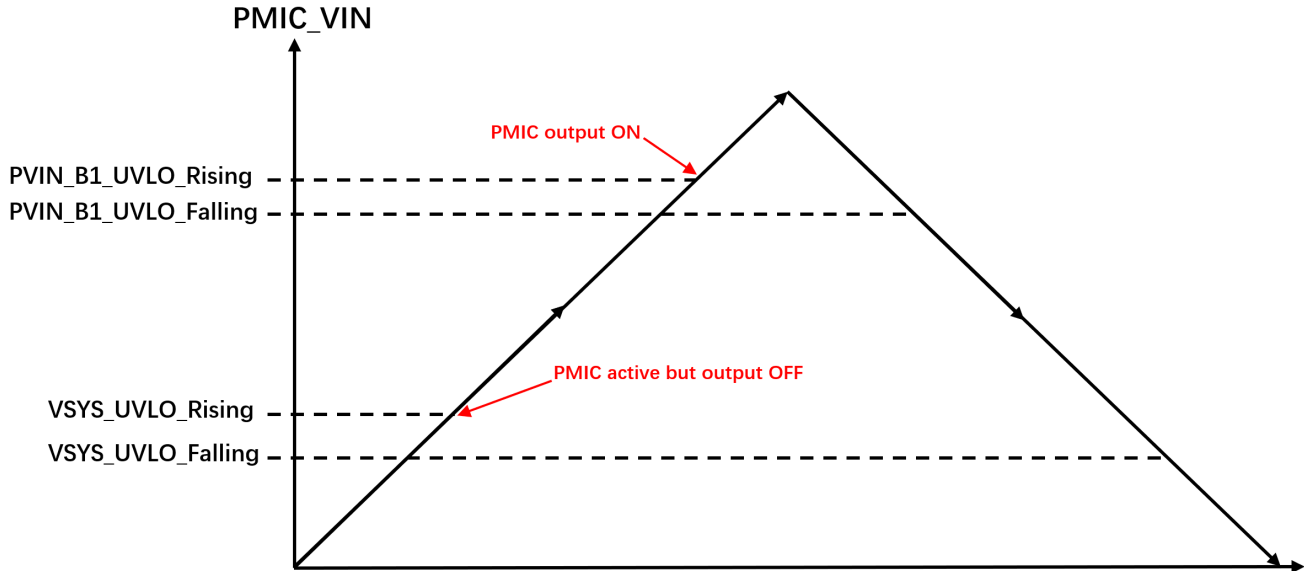


图 2-1. VSYS_UVLO 和 PVIN_B1_UVLO

2.2 多次触发 PVIN_B1_UVLO 会导致 PMIC 进入 WT_PWR_REC 状态

PVIN_B1_UVLO 有 Falling 和 Rising 两个可编程阈值，当输入电压上升时，需要达到 PVIN_B1_UVLO Rising 才能启动输出；当输入电压下降时，一旦达到 PVIN_B1_UVLO Falling 就会关闭输出。

当 TPS650362-Q1 的输入电压低于 PVIN_B1_UVLO Falling 会关闭输出，进入 SAFE 状态并生成错误中断。在 SAFE 状态下，如果输入电压高于 PVIN_B1_UVLO Rising，且无其他错误中断存在，PMIC 将重新进入 Active 状态。每次 PMIC 进入 SAFE 并恢复时，RECOV_CNT 计数+1。当计数达到 RECOV_CNT_THR 时，PMIC 将会进入 WT_PWR_REC 状态，需要对 VSYS 进行掉电重启，才能重新启动 PMIC。RECOV_CNT_THR 阈值一般默认 15 次，RECOV_CNT 计数器可以通过操作寄存器或掉电触发 VSYS_UVLO 后重启来进行清零。

TPS65224-Q1 的输入保护机制与 TPS650362-Q1 相同，触发 VCCA_{0V_TH} 会导致 PMIC Warm Reset，进入 To SAFE 状态。当输入电压高于 VCCA_{0V_TH}，PMIC 将重新进入 Active 状态。每次进入 To SAFE 状态，RECOV_CNT 计数+1，计数一旦超过 RECOV_CNT_THR，TPS65224-Q1 将一直保持在 SAFE_RECOVER 状态，需要通过掉电操作才能重新启动 PMIC。

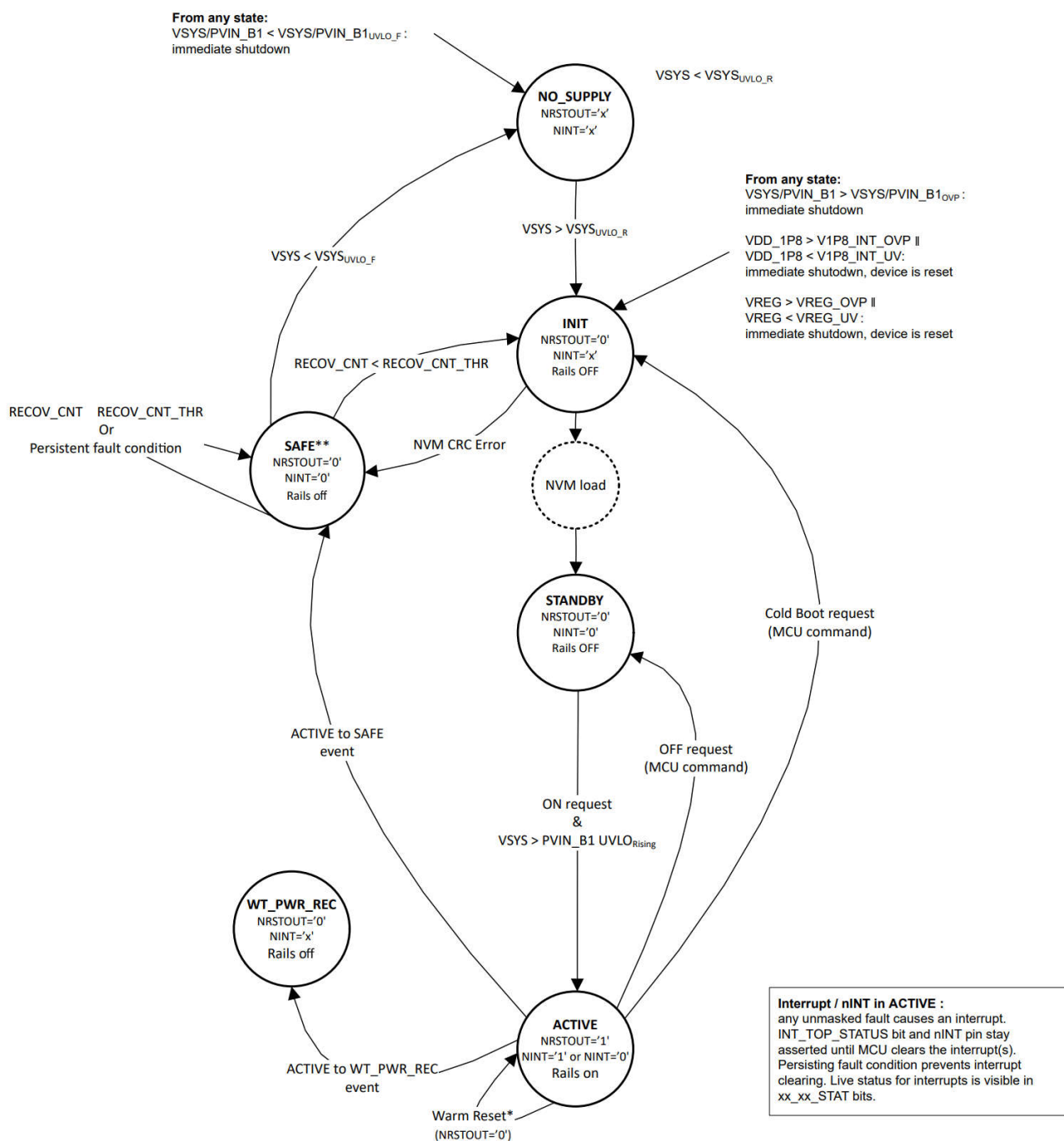


图 2-2. TPS650362-Q1 状态机

2.3 输入电压缓升缓降导致 PMIC 进入 WT_PWR_REC 状态的原因

PVIN_B1_UVLO 其实是一个非常通用的欠压保护机制，但在输入电压缓升缓降测试中，输入电压会长时间处于 PVIN_B1_UVLO 阈值附近，很可能会因为多次触发 UVLO 而导致 PMIC 进入 WT_PWR_REC 状态。其原因是，输入电压每次触发 PVIN_B1_UVLO Rising/Falling 会使 PMIC 输出开启/关闭，而 PMIC 输出的开启/关闭会引起输入电源电流负载变化，相当于对输入电源进行的抛/负载，这极易使输入电压出现过冲/下冲。

而在输入电压在缓升缓降测试过程中，输入电压会处于 PVIN_B1_UVLO Rising 和 Falling 阈值之间，如果输入电压的过冲/下冲太大，将会触发 PVIN_B1 UVLO Falling/Rising 而导致 PMIC 多次进入/退出 SAFE 状态。当

RECOVERY 计数达到 RECOV_CNT_THR 时，PMIC 将会进入 WT_PWR_REC 状态，造成测试结束后，电源恢复而复而 PMIC 无法继续工作，需要对 VSYS 进行掉电清零 RECOVERY 计数，才能重新启动 PMIC。

图 2-3 以 TPS650362-Q1 为例，在进行缓降测试中，PVIN_B1_UVLO Falling=4.5V，PVIN_B1_UVLO Rising=5.2V，RECOV_CNT_THR=15。PVIN_B1_VIN 因为过冲/下冲多次触发 PVIN_B1_UVLO，超过 15 次后，即使 PVIN_B1 电压超过 PVIN_B1_UVLO Rising=5.2V，PMIC 也没有输出。

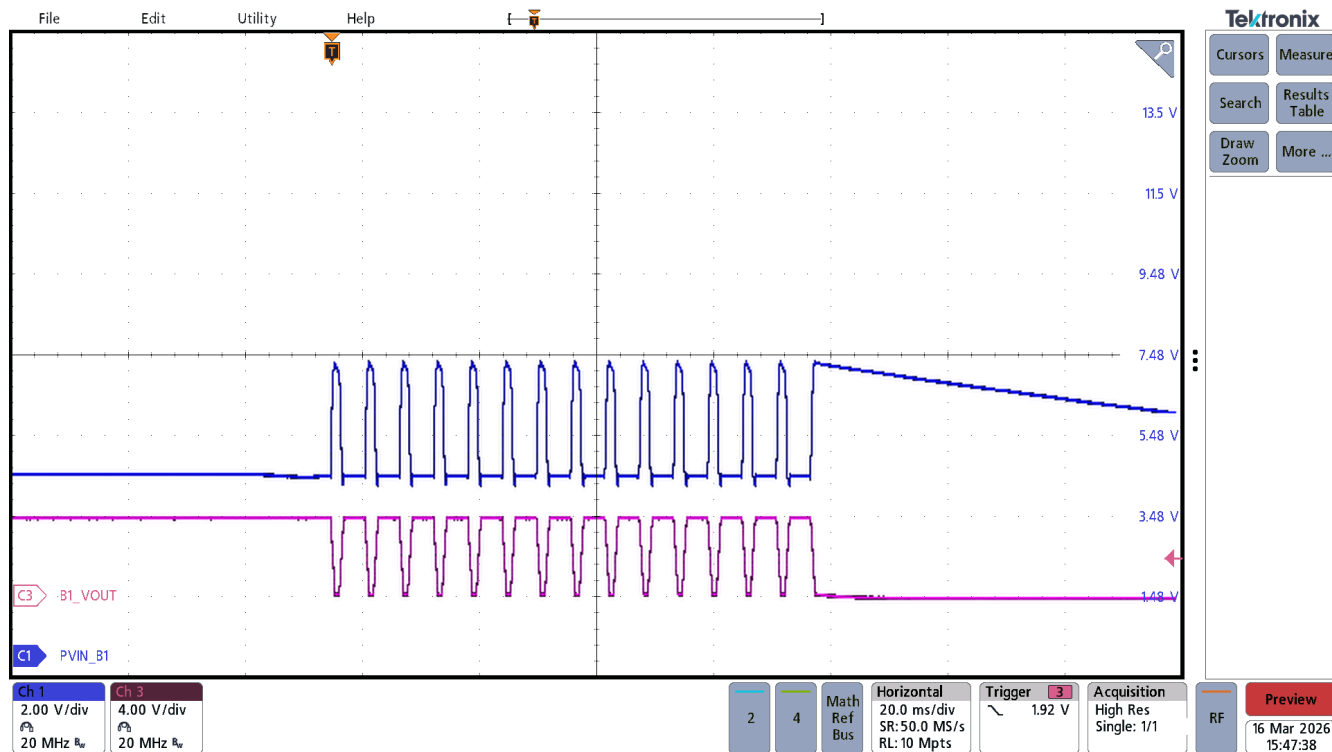


图 2-3. TPS650362-Q1 缓降测试中多次触发 PVIN_B1_UVLO 导致没有输出

3 宽电压输入类的 PMIC 常见解决方案

宽电压输入类的 PMIC 的输入电源通常为电池电源。电池电源往往存在负载较多，线束过长等情况，相比于稳压电源更易出现电压波动，而触发 PVIN_B1 UVLO Falling/Rising 阈值，使 RECOVERY 计数增加。一旦 RECOVERY 计数达到 RECOV_CNT_THR 时，PMIC 将会进入 WT_PWR_REC 状态。接下来以 TPS650362-Q1 为例，介绍几种常见的解决方案。

3.1 增大 PVIN_B1 UVLO Rising 和 Falling 之间的差值

在电源电压缓升缓降测试中，由于 PMIC 的输出关闭/开启导致的过冲/下冲，是导致多次输出 UVLO 的关键原因。因此通过增大 PVIN_B1 UVLO Rising 和 Falling 之间的差值，来避免因过冲/下冲而触发 UVLO。

以 TPS650362-Q1 为例，可以通过 BUCK1_UVLO 寄存器(0x1B) 将 PVIN_B1 UVLO Rising /Falling 阈值差距设置得大一些。图 3-1 通过设置 PVIN_B1 UVLO Falling =4.5V，PVIN_B1 UVLO Rising=8.32V 后，即使输入出现了超过 3V 的过冲，也没有触发 PVIN_B1 UVLO Rising。

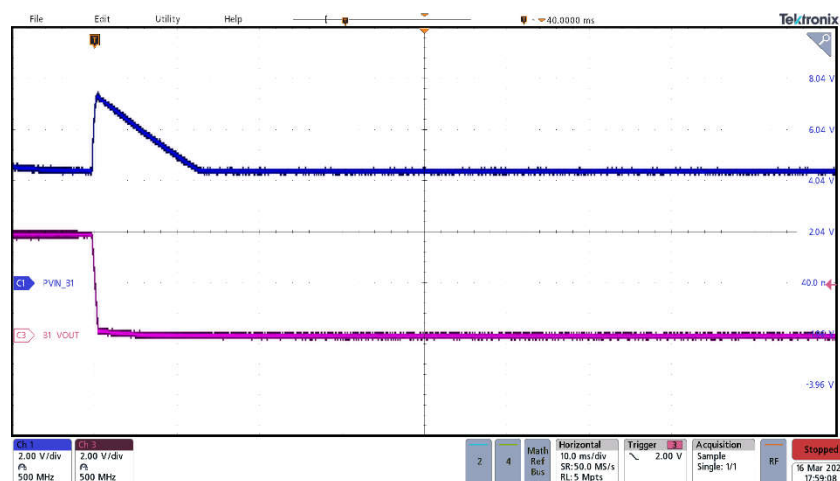


图 3-1. TPS650362-Q1 的过冲没有触发 PVIN_B1 UVLO Rising=8.32V

3.2 用理想二极管代替防反接二极管

由于 TPS650362-Q1 多应用于一级电源，直接使用电池电源输入。在实际应用中，为避免电池反接通常在电池和 PMIC 输入之间接有防反接二极管。而这通常会导致 PMIC 在关断时，防反接二极管和 PMIC 输入引脚之间缺少放电路径，在缓降测试中，更容易引起输入电压的过冲，触发 PVIN_B1 UVLO Rising。

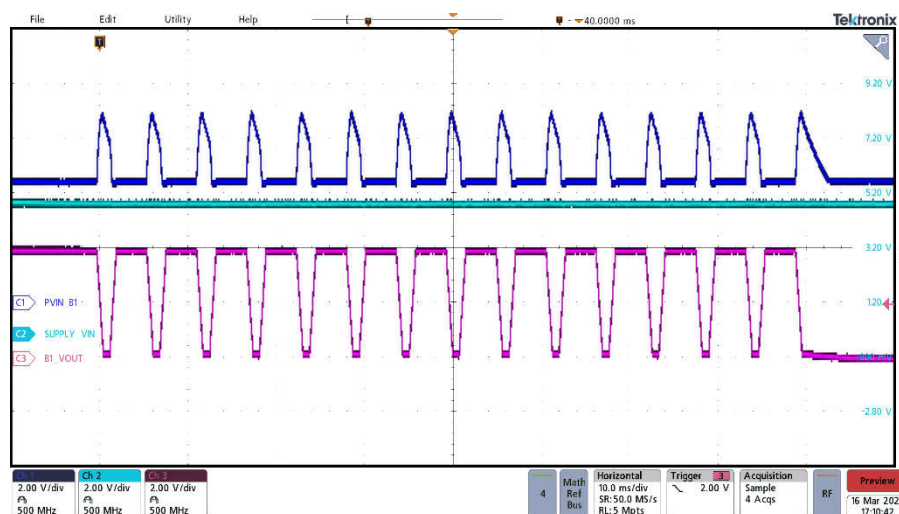


图 3-2. 防反接二极管容易导致 PMIC 输入出现过冲

推荐使用理想二极管控制器，以避免二极管的单向导通特性导致缺少放电电路，而产生过冲。图 3-3 使用 LM74501-Q1 代替二极管后，缓降测试中不再出现过冲。

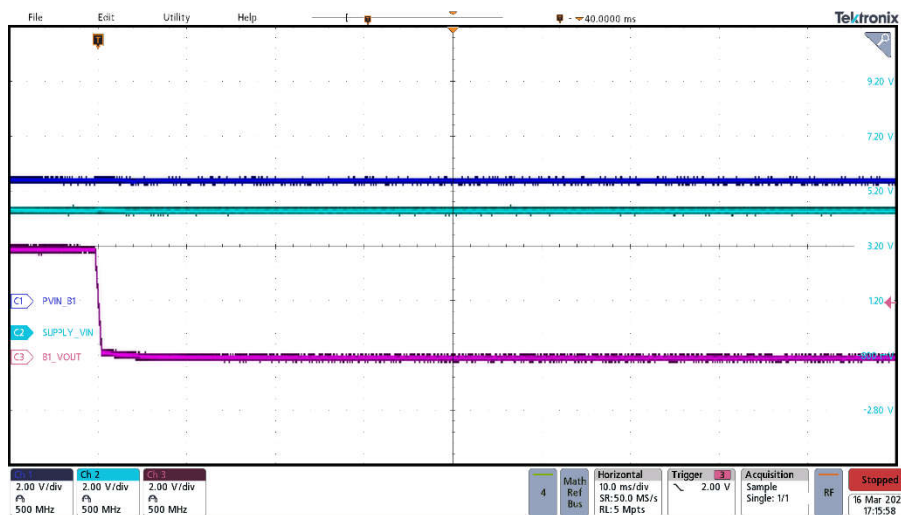


图 3-3. 使用理想二极管控制器后过冲消失

3.3 TPS650362-Q1 可以使用 Resistive discharge 替代 Active discharge 放电

TPS650362-Q1 的 BUCK1 输出提供两种放电形式: Resistive discharge 或 Active discharge，使用寄存器 BUCK1_CTRL Register (0x18) 进行选择。使用 Active discharge 时，BUCK1 会通过控制内部低边 MOSFET Switching 来控制放电的 Slew Rate。那么这个时候输出电感和 BUCK1 的内部功率 MOSFET 会构成一个对 PVIN_B1_VIN 输出的反向 boost。

如果 PVIN_B1_VIN 缺少放电路径，VIN 会在电压缓降测试中出现电压的意外抬升，导致 PMIC 进入反复触发 UVLO 的状态。

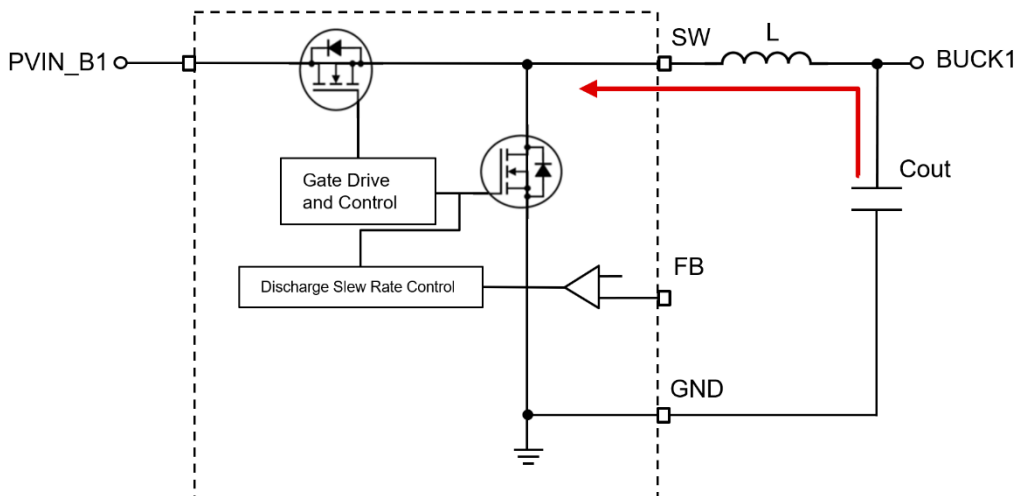


图 3-4. 反向 Boost 拓扑

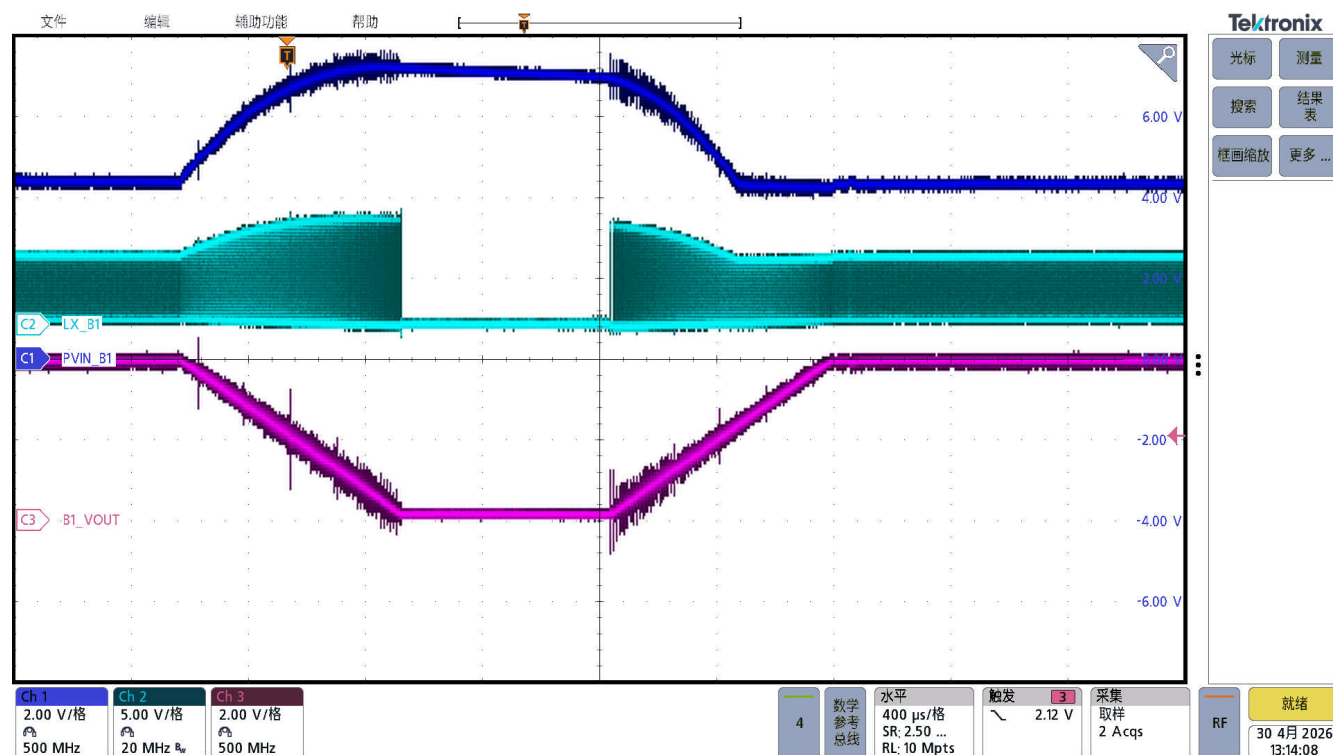


图 3-5. Active discharge 导致输入电压抬升

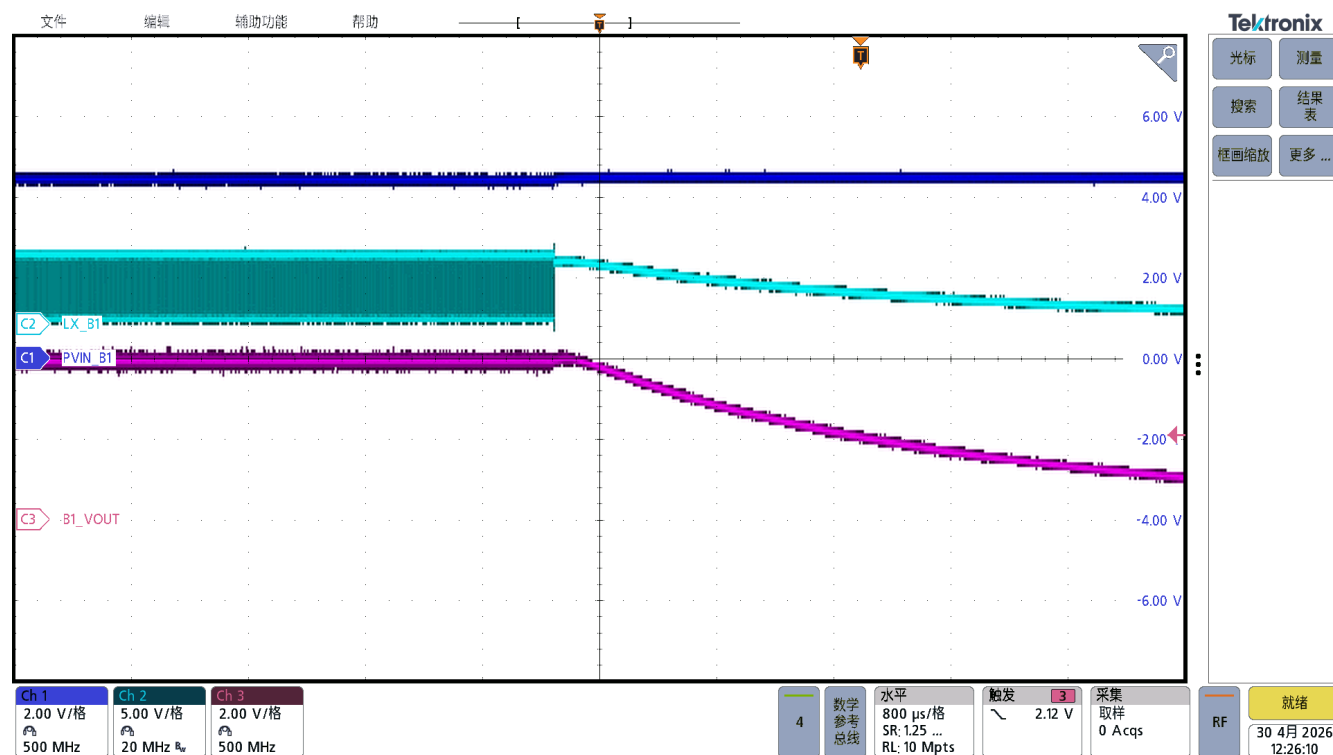


图 3-6. Resistive discharge 的输入电压不再抬升

4 低压输入类 PMIC 的常见解决方案

低压输入类 PMIC，如 TPS65224-Q1/TPS6594-Q1 在汽车缓升缓降测试中并不会直接接触系统输入电源，输入电源与 PMIC 之间通常会使用一级 BUCK 进行初步降压，再供电到 PMIC。但如果一级 BUCK 的环路不稳定，或者 BUCK 处于输入电压小于输出电压的 Dropout 状态，也会因为 BUCK 输出的不稳定，导致 PMIC 输入电压出现过冲/下冲，而多次触发 UVLO。

4.1 调节一级 BUCK 环路稳定性

PMIC 输出的开启/关闭会引起一级 BUCK 输出路径上的负载电流变化，如果一级 BUCK 的环路不够稳定，将引起 PMIC 输入电压出现过冲或下冲，触发 PMIC 的 UVLO。当触发次数超过 RECOV_CNT_THR 后，也会导致 PMIC 进入 SAFE 状态而无法继续工作。有关 BUCK 的环路调节部分，请参考[如何测试高精度的环路性能](#)，本文不再赘述。

4.2 避免一级 BUCK 在缓升缓降测试中处于 Dropout 状态

当一级 BUCK 的输入电压高于 VIN_UVLO 阈值但低于输出电压设定值时，或者输入电压和输出电压之间的压差小于最小压差要求，BUCK 会处于 Dropout 状态。尤其是在缓升缓降测试中，一级 BUCK 会长时间处于 Dropout 状态。这种状态下，环路调节极其不稳定，一旦输出电压达到 PVIN_B1_UVLO Rising，PMIC 将开启输出，这将导致一级 BUCK 输出轨上的负载波动，一级 BUCK 输出电压出现下冲，触发 PMIC 的 UVLO。如果触发次数超过 RECOV_CNT_THR 后，也会导致 PMIC 进入 SAFE 状态而无法继续工作。

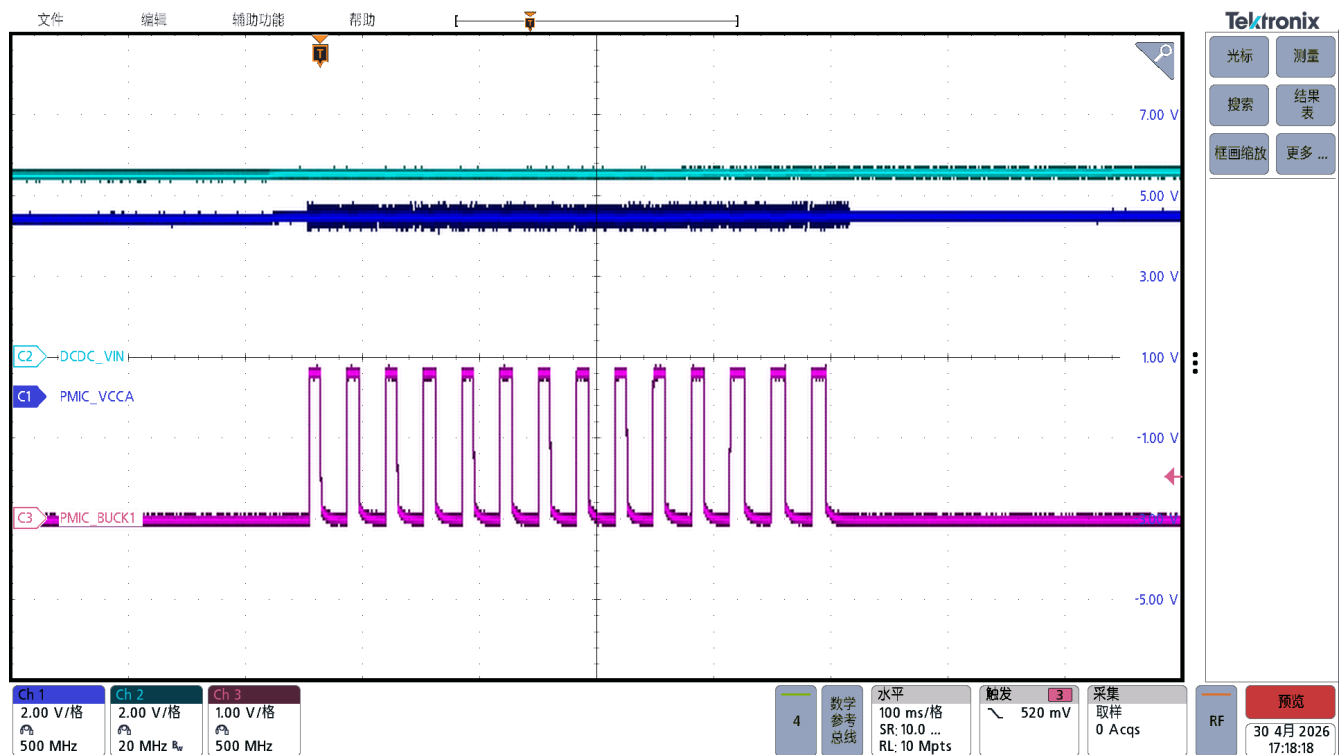


图 4-1. 一级 BUCK Dropout 状态下输出不稳定，触发 PMIC UVLO

为避免 PMIC 在 BUCK 的 Dropout 状态下进行启动，可以通过对一级 BUCK 的 EN 引脚设置额外的导通阈值来实现。如 [图 3-3](#) 电路，分别指定 V_{ON} 为 BUCK 的导通电压， V_{OFF} 为 BUCK 的关断电压，那么 V_{ON} 和 V_{OFF} 将由 [公式 1](#) 和 [公式 2](#) 进行计算得出。

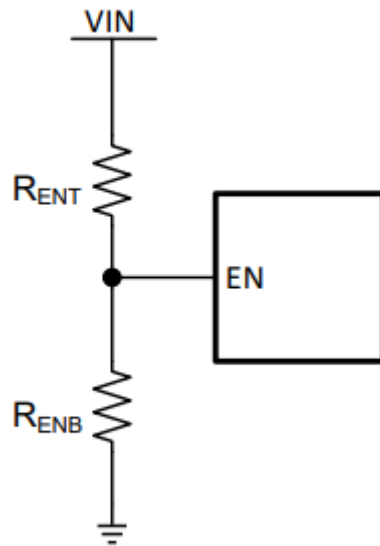


图 4-2. 通过 EN 引脚设置一级 BUCK 的 UVLO

$$V_{ON} = \left(1 + \frac{R_{ENT}}{R_{ENB}}\right) \times V_{EN-H} \quad (1)$$

$$V_{OFF} = \left(\frac{V_{ON}}{V_{EN-H}}\right) \times V_{EN-L} \quad (2)$$

其中：

V_{EN-H} 为 BUCK 的 EN 引脚逻辑高电平

V_{EN-L} 为 BUCK 的 EN 引脚逻辑低电平

5 非功能安全系统可以关闭/屏蔽 RECOV_CNT_THR 来避免进入 SAFE/OFF 状态

对于没有功能要求的系统，可以通过关闭 RECOV_CNT_THR 来解除 PMIC 重启次数限制。以 TPS65219-Q1 为例，通过在 NVM 中设置 0x24[7] = 1，屏蔽 RETRY_COUNT，这样在电源缓升缓降测试中，即使多次触发 UVLO 也不会因为进入 SAFE 状态而无法继续工作。

6.7.37 INT_MASK_UV Register (Offset = 24h) [Reset = X]

INT_MASK_UV is shown in [Figure 6-54](#) and described in [Table 6-45](#).

Return to the [Summary Table](#).

Figure 6-54. INT_MASK_UV Register

7	6	5	4	3	2	1	0
MASK_RETRY_COUNT	BUCK3_UV_MASK	BUCK2_UV_MASK	BUCK1_UV_MASK	LDO4_UV_MASK	LDO3_UV_MASK	LDO2_UV_MASK	LDO1_UV_MASK
R/W-X	R/W-X	R/W-X	R/W-X	R/W-X	R/W-X	R/W-X	R/W-X

Table 6-45. INT_MASK_UV Register Field Descriptions

Bit	Field	Type	Reset	Description
7	MASK_RETRY_COUNT	R/W	X	When set, device can power up even after two retries. (Default from NVM memory) 0h = Device does retry up to 2 times, then stay off 1h = Device does retry infinitely

图 5-1. TPS65219-Q1 MASK_RETRY_COUNT 寄存器

6 参考文献

1. [TPS65036x-Q1 Automotive Camera, Radar and MCU PMIC datasheet \(Rev. A\)](#)
2. [LM636x5-Q1 3.5V to 36V, 1.5A and 2.5A, Automotive, Step-Down Voltage Converter datasheet \(Rev. I\)](#)
3. [TPS65224-Q1 Power Management IC \(PMIC\) with 4 BUCKs and 3 LDOs for Safety-Relevant Applications datasheet \(Rev. A\)](#)
4. [TPS65219-Q1 Integrated Power Management IC for ARM Cortex—A53 Processors datasheet \(Rev. B\)](#)
5. [LM74501-Q1 TVS Less Automotive Reverse Battery Protection Controller datasheet \(Rev. A\)](#)

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