

TPS65988DH：具有功率平衡功能的集成式 Type-C PD 双端口壁式插座



Prajith Cheerakkoda, Shashank Meti

摘要

Type-C PD 电源端口可提供较高的功率，并且可以兼容更多电池供电器件，成为了当今小工具爱好者的优选。因此，集成式 Type-C PD 壁式插座比集成式 Type-A 壁式插座更快地普及开来。为何说 TI 的高度可配置和集成式 PD 控制器 TPS65988DH 会是您下一个 Type-C/PD 设计的组成部分，这是本应用手册探讨的主题。凭借高度灵活的 GPIO 事件功能，TI PD 控制器可以实现端口间功率平衡所需的控制逻辑，并作为一个完整的独立解决方案发挥作用。此功能允许从系统中移除原本强制性使用的 MCU（微控制器单元），从而减轻固件开发工作量并降低系统复杂性。本应用手册将介绍如何利用 GPIO 事件功能在端口之间实现功率平衡。当使用 TI 高度可配置的 PD 控制器设计终端器件（如智能插头、多端口适配器、航空电子器件座椅靠背和其他仅多端口源应用）时，此功能非常有用。

本应用手册还涵盖有关 GUI 配置的分步说明，用以实现功率平衡所需的控制逻辑。此应用手册中提供的示例工程文件可用于测试 TPS65988EVM 上的控制逻辑。

内容

1 引言.....	2
2 集成式 USB 壁式插座设计.....	3
2.1 散热注意事项.....	4
2.2 动态端口功率平衡.....	5
2.3 GPIO 事件.....	5
2.4 使用 GPIO 事件实现控制逻辑.....	6
2.5 GUI 配置.....	7
2.6 测试设置和结果.....	13
3 参考文献.....	17
4 修订历史记录.....	17

插图清单

图 2-1. 集成式 Type-A USB 充电端口框图.....	3
图 2-2. 集成式 Type-C PD USB 充电端口框图.....	3
图 2-3. 使用 TPS65988DH 内部电源开关的双端口集成 Type-C PD 壁式插座架构.....	4
图 2-4. 具有功率平衡功能的双端口电源插座设计.....	5
图 2-5. GPIO 事件.....	6
图 2-6. 具有功率平衡功能的双端口电源插座设计中的 GPIO 事件使用情况.....	7
图 2-7. 加载模板文件.....	8
图 2-8. 生成配置集并映射至虚拟地址.....	9
图 2-9. 应用配置寄存器项.....	10
图 2-10. 选择 Transmit Source Capabilities（传输拉电流能力）寄存器.....	11
图 2-11. 配置 Transmit Source Capabilities（传输拉电流能力）.....	12
图 2-12. GPIO 映射.....	13
图 2-13. EVM 方框图.....	14
图 2-14. EVM 上的 GPIO 设置.....	14
图 2-15. 显示对应于单端口连接和双端口连接的 PDO 的 PD 布线.....	15
图 2-16. Vbus 转换的示波器捕获.....	16

商标

USB Type-C® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

为了减少电子废弃物，USB-IF 也重新定义了 USB 端口用作通用电源接口时起到的作用。重点是更快的高效电力传输，以满足日益增长的电池供电应用需求。这种方法在 USB 行业中被广泛接受，并且越来越多的非 USB 原始设备制造商 (OEM) 将其作为一种优选的供电方法用于产品中，如电动剃须刀、便携式扬声器。与壁式插座上的 Type-A 端口不同，具有更高功率的 Type-C PD 端口可以用于更广泛的消费电子产品，并真正有助于减少适配器混乱。

壁式插座设计中固有的设计挑战（限制 PCB 面积和接线盒内的散热）使得 Type-C PD 集成更具挑战性。话虽如此，让我们来看看 TI 的高度集成和可配置的 TPS665988DH PD 控制器如何帮助您推出下一款 Type-C PD 壁式插座，并缩短开发周期以跟上市场步伐。

2 集成式 USB 壁式插座设计

集成式 USB 壁式插座可容纳面板上的 USB 充电端口以及交流输出端子。

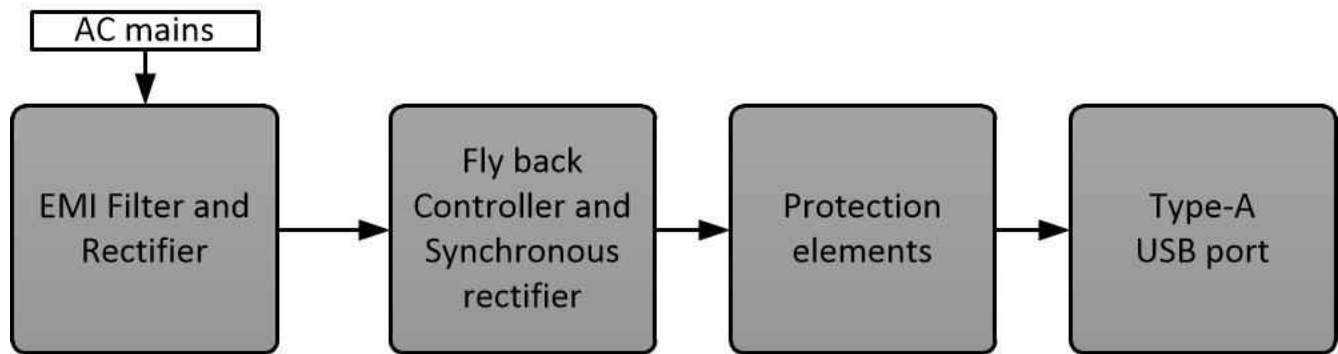


图 2-1. 集成式 Type-A USB 充电端口框图

图 2-1 显示了构成壁式插座上传统 USB Type-A 充电端口的不同模块。EMI 滤波器和整流器模块从交流电源输入端产生高压直流电。高频隔离反激式控制器和同步整流器模块为充电器端口提供稳压直流电。保护元件用于保护 USB 端口免受故障干扰，如欠压保护 (UVP)、过压保护 (OVP)、反向电流保护 (RCP) 和过电流保护 (OCP)。

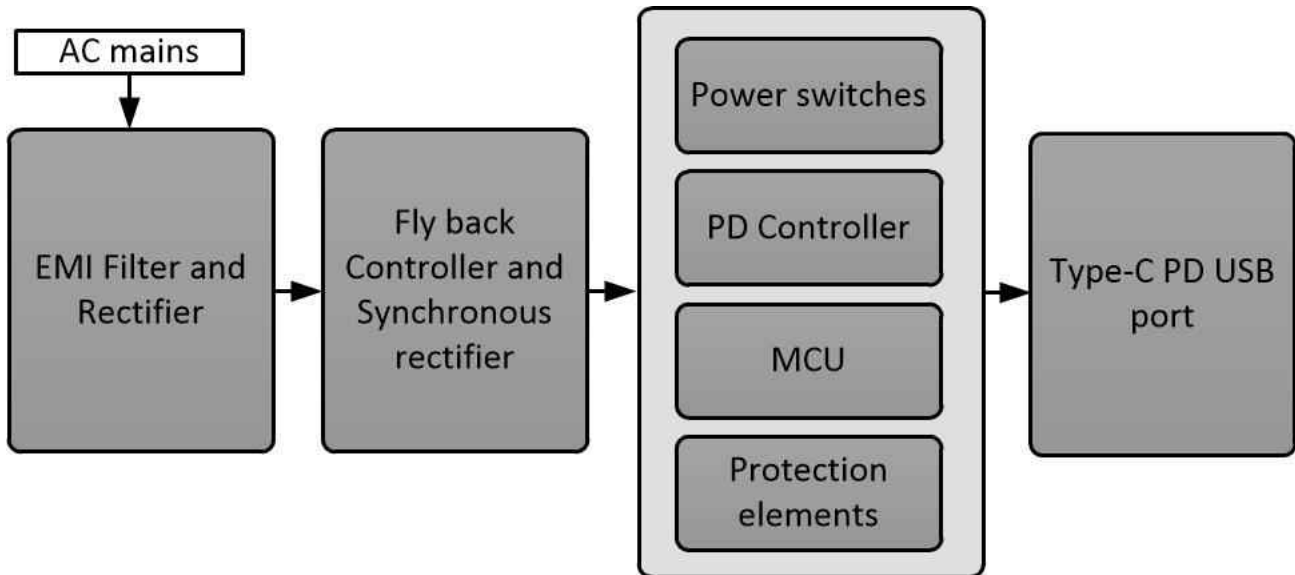


图 2-2. 集成式 Type-C PD USB 充电端口框图

现在，如图 2-2 中所示，与传统的 Type-A 端口相比，Type-C PD 充电端口需要的附加组件非常少。

1. PD 控制器：添加 Type-C PD 功能。
2. 电源开关：根据 PD 规格控制输送至端口的电源。
3. 保护元件：保护 USB 端口不受 OVP、UVP、OCP、RCP 等故障的影响。
4. MCU：需要在固定功能 PD 控制器中实现自定义电源策略（如果需要）。

插头和插座制造商必须遵循监管标准（如 BS 1363）规定的机械尺寸。一个电气接线盒的尺寸通常为 4 英寸（长）x 2.75 英寸（宽）x 2.5 英寸（深）。盒内 PCB 的实际可用面积将小于此面积，因为前面板后面的接线盒必须容纳连接面板上交流端子的粗导线。现在，系统设计师需要在这些限制条件下，在壁式插座设计中为 Type-C PD 相关组件寻找额外的空间，这是一个挑战。

如今，市场上的大多数 PD 控制器都需要外部功率 MOSFET 来控制 Type-C 端口的功率传输。使用这种 PD 控制器的系统设计师必须在外部电源开关周围构建相关保护电路，并需要额外的 PCB 面积和 BOM。根据 Type-C/PD

规范，拉电流端口（提供电源的 Type-C PD 端口）必须提供 OCP 保护。TI 的高度集成双端口 PD 控制器 TPS665988DH 配备集成式电源开关和内置保护功能，不再需要这些额外的外部组件。

USB PD 器件应用通常需要定制才能实现所需的系统行为。例如，双端口壁式插座设计（将在本应用手册后面部分中讨论）中需要定制，才能实现端口之间的带电功率平衡。核心固件中进行的任何定制都会影响可靠性、USB PD 合规性，并且还会使开发周期延长。通常，在这方面，使用固定功能 PD 控制器的系统需要具有板载微控制器，TI PD 控制器除外。TPS65988DH 的 GPIO 事件功能允许 PD 系统设计师使用 GUI 软件工具自定义 PD 控制器行为，而不会影响核心 PD 固件。

2.1 散热注意事项

面板是驱散接线盒内产生的热量的唯一途径。因此，应将重点放在选择功耗较小的组件上。在集成壁式插座设计中，USB 端口的最大输出功率受交流/直流和直流/直流稳压器效率的限制。与上述组件在功率路径上发出的热量相比， $R_{ds(on)}$ 为 $28\text{m}\Omega$ （在 84°C 的结温下）的 TPS665988DH 内部电源开关的功耗非常少。 65°C 环境温度下的结温计算表明，TPS665988DH 远低于 150°C 的最高结温。

- 接线盒内的环境温度（主要由交流/直流变压器贡献）(T_a) = 65°C
- TPS65988DH 的结至环境热阻 ($R_{\theta Ja}$) = 36.4°C/W
- 3A 的 IPPHV（通过从 PP_HVx 到 VBUSx 的电源路径的持续电流）造成在内部电源路径上的功耗 = $R_{ds(on)} * I_{out} * I_{out} = 28\text{m}\Omega * 3\text{A} * 3\text{A} = 252\text{mW}$ 。
- 两条功率路径的总功耗 = 504mW
- 总功耗（考虑 GPIO 泄漏和工作功耗 I_{VIN_3V3} ） $P \sim 520\text{mW}$
- 结温 = $T_a + (R_{\theta Ja} * P) = 65^\circ\text{C} + (36.4^\circ\text{C/W} * 0.52\text{W}) = 83.9^\circ\text{C}$

按照数据表中的建议，通过仔细的 PCB 设计，可以将结温降到较低的值。

上述热计算考虑了使用 TI PD 控制器内部电源路径的架构（如图 2-3 所示）。在本设计中，降压/升压稳压器由交流/直流稳压器的输出供电。因此，需要交流/直流稳压器来维持降压/升压稳压器工作所需的最低电压。可将 PD 控制器的 I2C 主控制器编程为配置稳压器，以根据各端口上的 PD 协商提供固定直流电压。如需更详细地了解配置 TPS665988DH 的 I2C 主器件以触发特定 PD 事件的从器件写入，请参阅在 TPS65987D 和 TPS65988 PD 控制器中使用 I2C 主器件应用报告。

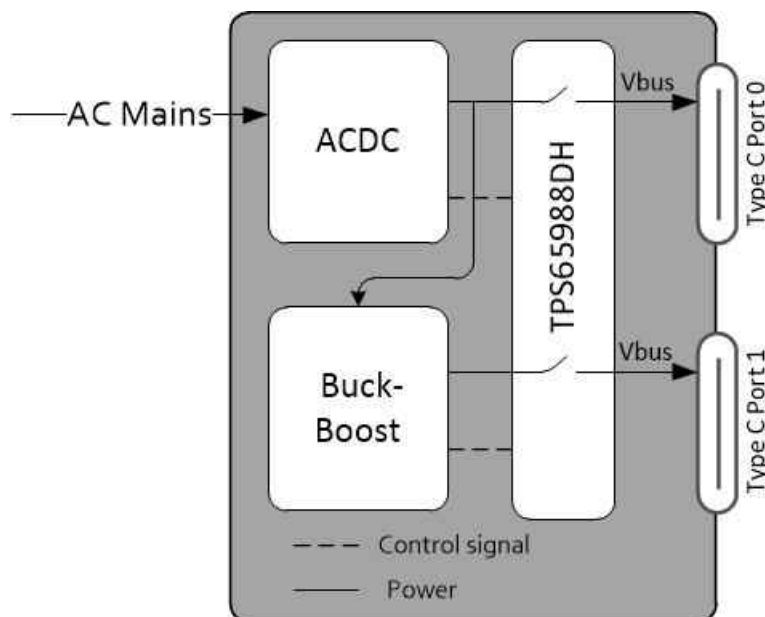


图 2-3. 使用 TPS665988DH 内部电源开关的双端口集成 Type-C PD 壁式插座架构

2.2 动态端口功率平衡

TPS665988DH PD 控制器具有较高的集成度，是电源插座设计的理想选择。在任何电源设计中，过电流、过压、欠压和反向电流保护等保护功能都是十分必要的，大多数情况下，系统设计者必须在外部添加这些保护元件。支持 100W 的内部集成电源路径内置所有这些保护功能。

为了有效使用系统电源，需要根据下面列出的端口连接动态地共享端口之间的可用电源。

- 当未连接任何端口时，总功率应可用于连接到任一端口的第一个器件。
- 连接第二个器件时，总功率应在两个端口之间平均分配。

在讨论中，假设可用的最大系统功率为 60W。

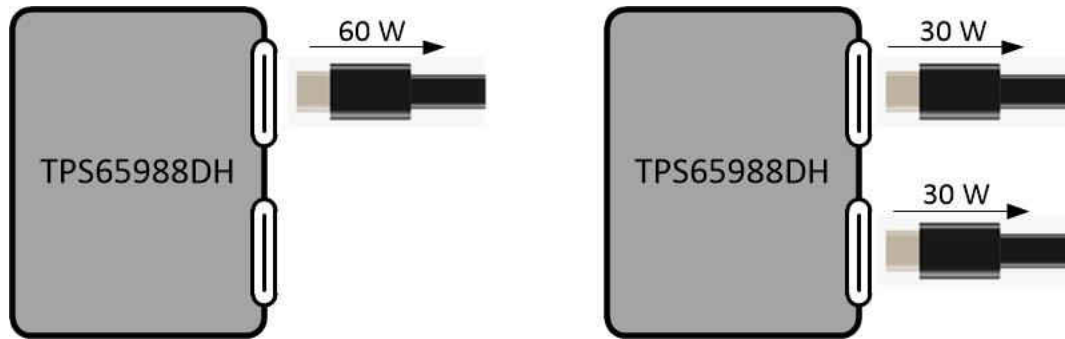


图 2-4. 具有功率平衡功能的双端口电源插座设计

在不修改固件的情况下，此设计可以通过实时加载修改后的 PD 端口配置来实现，这通常需要一个外部 MCU。使用 GPIO 事件的 TPS665988DH 可以实现相同的设计，无需修改任何固件，也无需外部 MCU。

每个端口都可以配置为具有两个端口电源配置文件，并根据控制逻辑动态地进行选择。

- **配置 1：100% 功率 PDO [1]** (仅连接一个端口时，广播系统可用的总功率，本例中为 60W)
- **配置 2：50% 功率 PDO** (连接两个端口时，总功率的 50%，本例中为 30W)。

备注

电源数据对象 (PDO)：用于将源端口的电源功能作为 Source_Capabilities 消息的一部分公开的数据对象。

GPIO 事件用于根据来自一个端口的插件事件，在运行时为另一个端口动态地加载适当的配置 (100% 或 50% PDO)。以下部分将介绍 GPIO 事件，并将其在该特定设计中的用法作为示例。

2.3 GPIO 事件

GPIO 事件功能使用户能够将 PD 控制器内的 PD 或 USB Type-C 事件映射到 GPIO (请参阅图 2-5)。

- 当发生所映射的 PD/Type-C 事件时，输出 GPIO 事件会根据用户选择的极性使 GPIO 引脚生效/失效。例如，插入事件可用于反映 GPIO 上的 Type-C 插拔。
- 类似地，输入 GPIO 事件 (TPS665988DH GPIO 引脚上的上升沿或下降沿，来自系统中的外部信号) 可用于触发 PD 控制器内的特定 PD 或 USB Type-C 事件。例如，故障输入事件使外部器件能够触发给定端口上的错误恢复。[2]。

使用配置工具，可将从下拉菜单中拾取的预定义事件映射至任何 GPIO。所有 GPIO 事件的列表可在 PD 控制器的 TPS65987DDH 和 TPS65988DH 主机接口技术参考手册中找到。

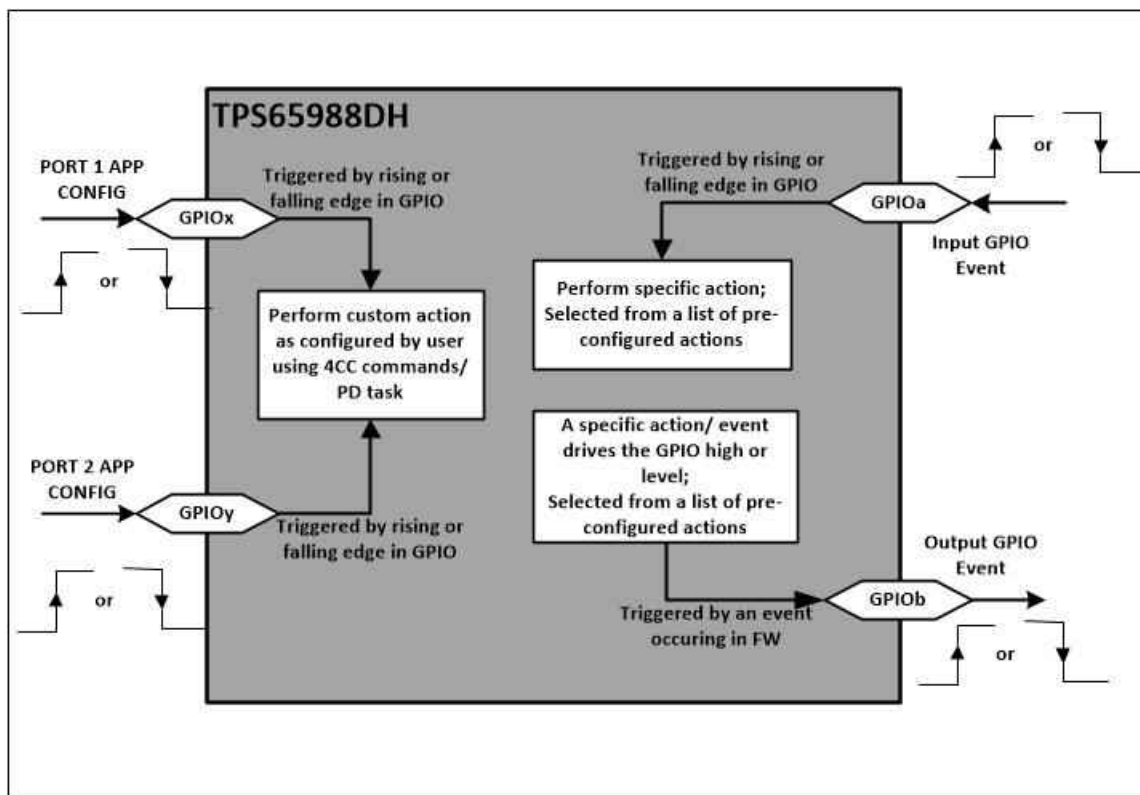


图 2-5. GPIO 事件

- 与触发预定义 PD 或 USB Type-C®事件的输入 GPIO 事件不同，应用配置 GPIO 事件在设计中提供了更大的灵活性，可以使用输入 GPIO 来触发自定义操作（请参阅图 2-5）。用户可以使用 4CC 命令或 PD 任务在配置工具中配置自定义操作，否则需要由 EC 来发布相同的操作。此外，映射到应用配置事件的输入 GPIO 可用于在运行时将修改后的配置加载至 PD 控制器。

备注

- 有关 4CC 命令/PD 任务的详细信息，请参阅 [TPS65987DDH 和 TPS65988DH 主机接口技术参考手册](#)。
- 错误恢复是从任何故障状态恢复的 Type-C 状态。在错误恢复状态期间，Type-C 端口会在定义的时间内移除 CC 终端并将其放回。这是为了模拟分离事件并建立新连接。

2.4 使用 GPIO 事件实现控制逻辑

图 2-6 显示了具有功率平衡功能的双端口电源插座设计中使用的事件和 GPIO 的图形表示。

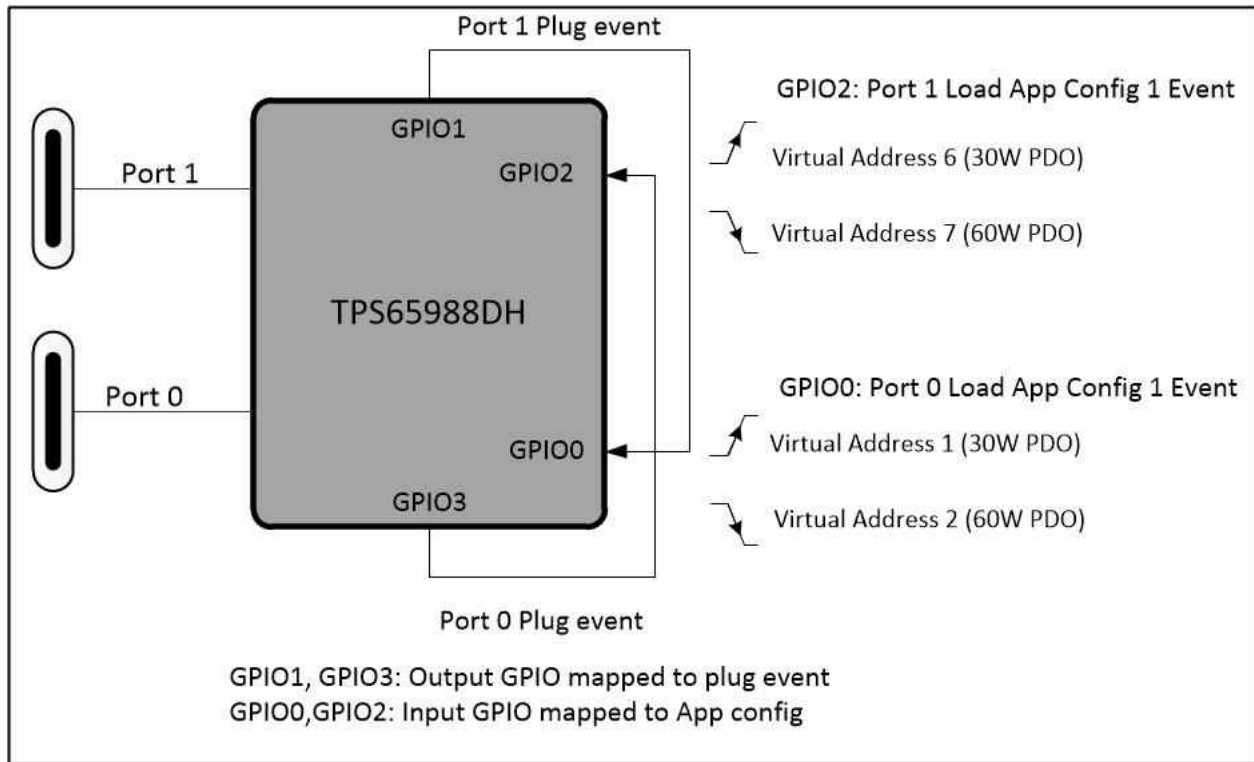


图 2-6. 具有功率平衡功能的双端口电源插座设计中的 GPIO 事件使用情况

- 输出插入事件 GPIO：GPIO1（端口 1 插入事件）和 GPIO3（端口 0 插入事件）配置为在 *PLUG_EVENT* 事件上生效。当器件连接到相应端口时，这些输出 GPIO 应配置为较高。
- 应用配置事件 GPIO：GPIO2（端口 1 应用配置）和 GPIO0（端口 0 应用配置）是输入 GPIO，配置为根据输入信号加载适当的配置（100% 或 50% PDO），并执行 PD 消息任务（以发送 SSrC - PD 发送拉电流能力）。

输出插入事件 GPIO 连接到备用端口的输入应用配置 GPIO。当特定端口的输入 GPIO 较高（意味着另一个端口上有插入事件）时，输入 GPIO 事件应加载 50% 功率 PDO 配置。否则，当特定端口的输入 GPIO 较低时（意味着另一端口上没有 *PLUG_EVENT*，例如，当另一端口处于断开状态时），输入 GPIO 事件应加载 100% 功率 PDO 配置。可以使用 [E2E 设计支持](#) 论坛上提供的工程文件在 [TPS65988D EVM](#) 上测试此实现方案。

2.5 GUI 配置

1. 第一步是通过加载默认模板 *TPS65988DDH_advanced_v6_1_2.tpl* 来创建一个新的仅限 DFP（仅限拉电流）工程。
 - a. 打开 [TPS6598x 配置工具](#)，然后点击 *Project*（工程）选项卡。
 - b. 选择 TPS65988DDH → Advanced → Downstream Facing Port (DFP) only（TPS65988DDH → 高级 → 仅下行端口(DFP)）。

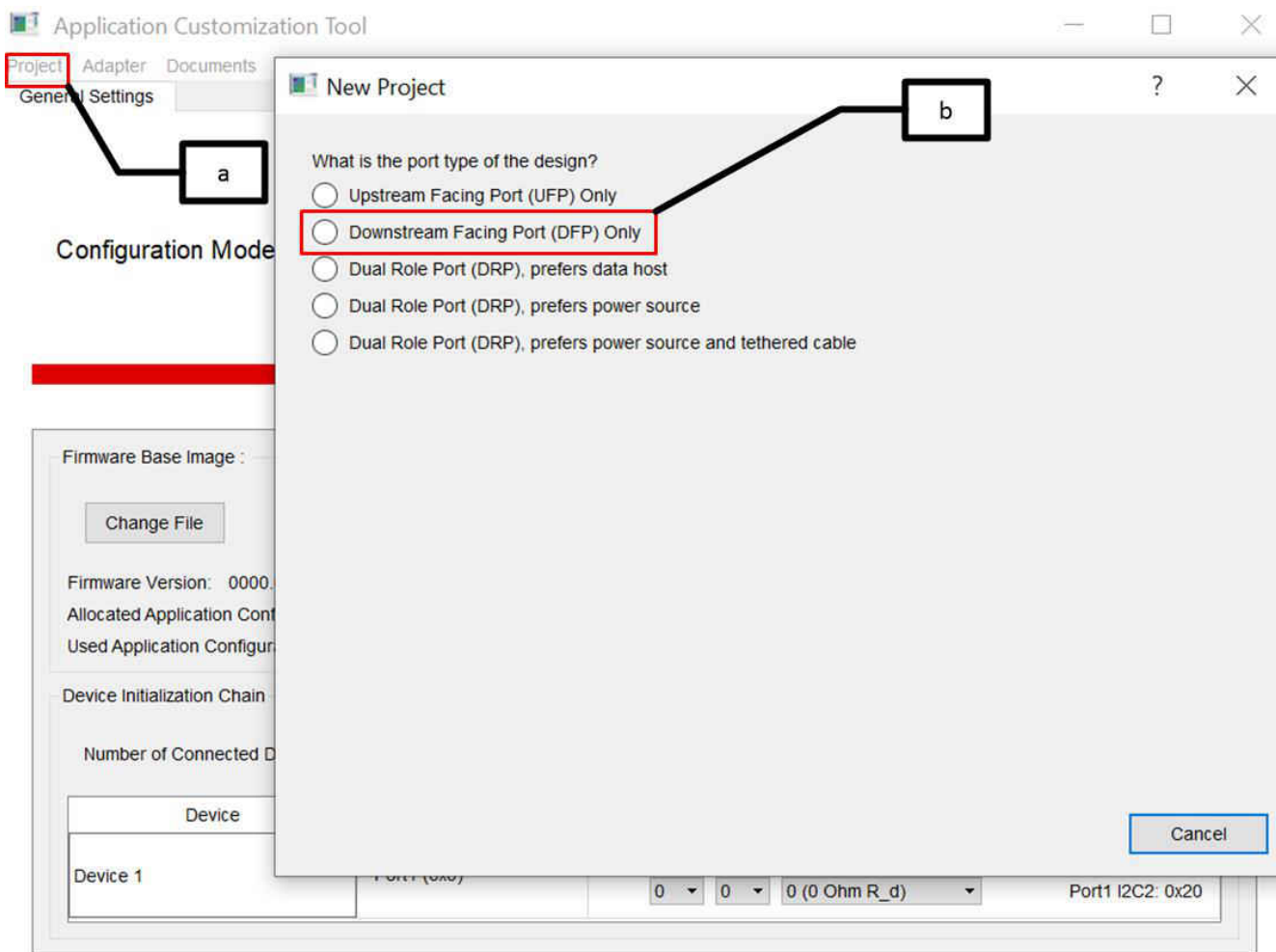


图 2-7. 加载模板文件

2. 如图 2-6 中所示，该应用要求每个端口有两组功率配置文件：相应的 30W 和 60W PDO。在此步骤中，生成这些配置并将它们映射至虚拟地址。
 - a. 将“常规设置”中的“配置集数量”更改为 4。
 - b. 为方便起见，请按如下所示重命名配置集。
 - i. 虚拟地址 1 -> 端口 0 30W
 - ii. 虚拟地址 2 -> 端口 0 60W
 - iii. 虚拟地址 3 -> 端口 1 30W
 - iv. 虚拟地址 4 -> 端口 1 60W
 - c. 现在，将配置设置映射至虚拟地址，如图 2-8 中所示。

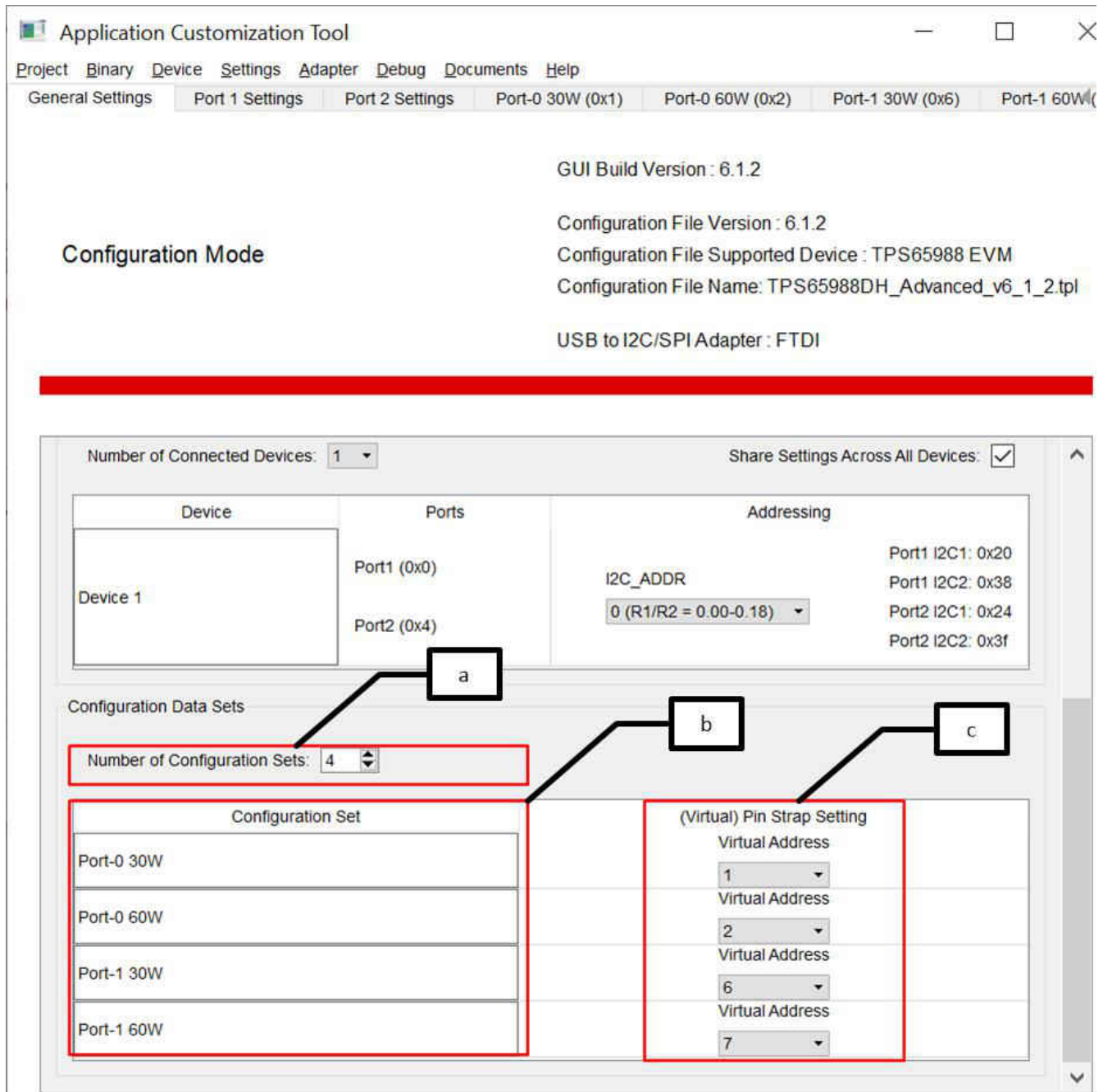


图 2-8. 生成配置集并映射至虚拟地址

备注

请勿使用地址 0x00 和 0x04，因为它们是为端口配置保留的。

3. 应用配置寄存器 (0x6C) 保存指向 GPIO 生效/失效时需要加载的应用配置的索引，还保存用于执行 PD 消息任务的命令通道接口。在此步骤中，修改端口 0 应用配置寄存器，以在 GPIO 高转换（对应于应用配置端口 0 30W）时指向应用配置索引虚拟地址 1，在 GPIO 高转换（对应于应用配置端口 0 60W）时指向虚拟地址 2，然后使用 CMD1 通道执行 SSrC 任务。
 - a. 点击 **Port 1 Settings**（端口 1 设置）选项卡。
 - b. 点击 **App Configuration Register**（应用配置寄存器）。
 - c. 从 **Value**（数值）选项卡下方的下拉菜单中选择需要在 GPIO 低/高转换时加载的配置索引。
 - d. 默认命令通道 CMD1 (0x08) 可用于执行 PD 消息任务。

- e. 从下拉菜单中选择 PD 消息任务 **SSrC**，以传输在应用配置空间中配置的拉电流能力，该空间由虚拟地址 1 或虚拟地址 2 索引。在 **not Task** 字段中输入 **!CMD**，以表示无操作。

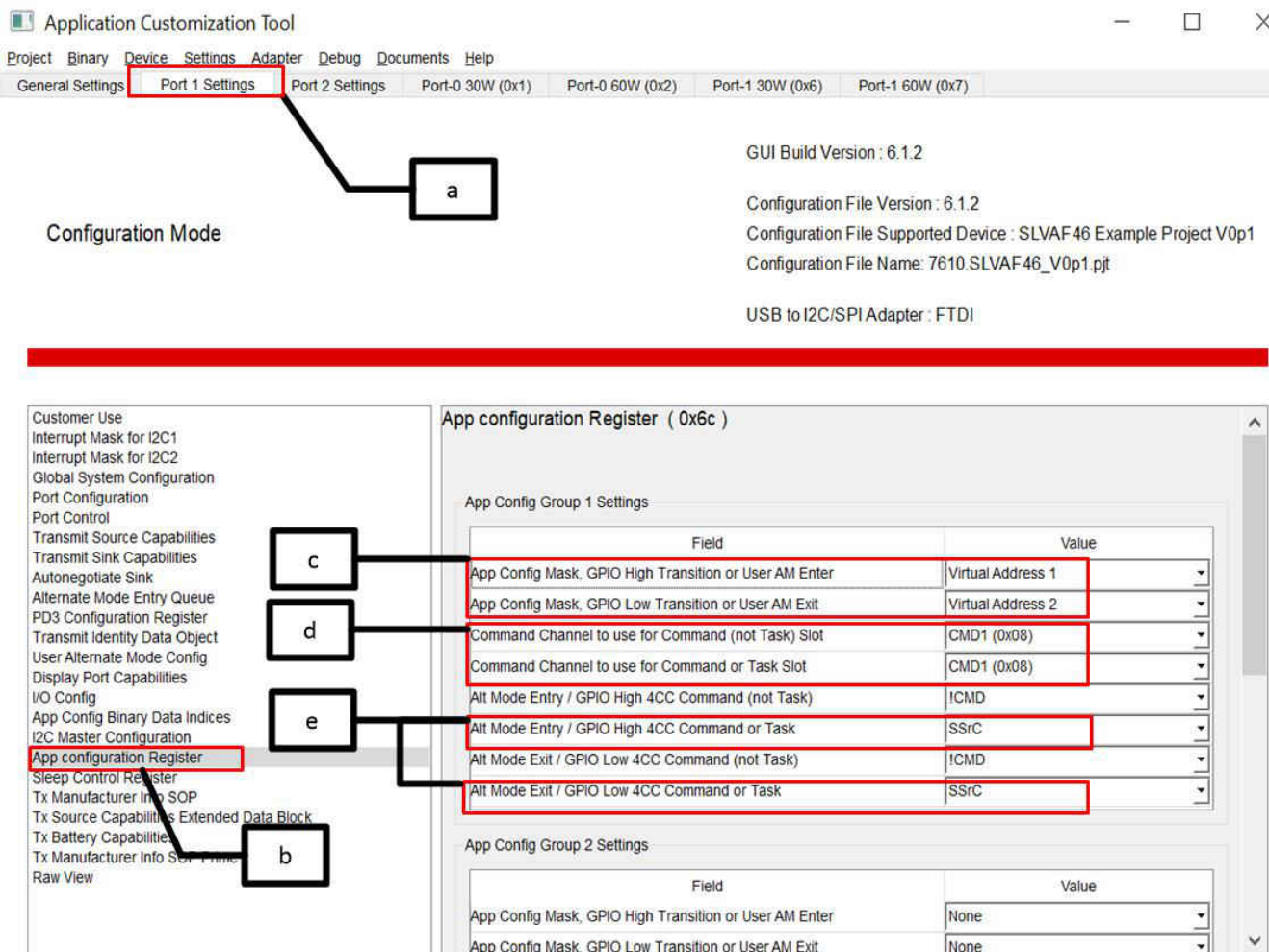


图 2-9. 应用配置寄存器项

- 同样，通过参考随附的 **pjt** 文件，为端口 1 应用配置寄存器创建条目。
- 现在，配置由虚拟地址索引指向的 **Transmit Source Capabilities**（传输拉电流能力）寄存器 (0x32)。虚拟地址 1 是对应于 30W PDO 的索引。
 - 点击 **Port-0 30W (0x1)**（端口-0 30W (0x1)），然后点击 **Adjust Registers**（调整寄存器）。
 - 从弹出框中，选择 **Transmit Source Capabilities (0x32) Register**（传输拉电流能力 (0x32) 寄存器）。
 - 点击 **OK**（确认）。
 - 点击 **Transmit Source Capabilities**（传输拉电流能力），并输入 30W PDO，如图 2-11 中所示。

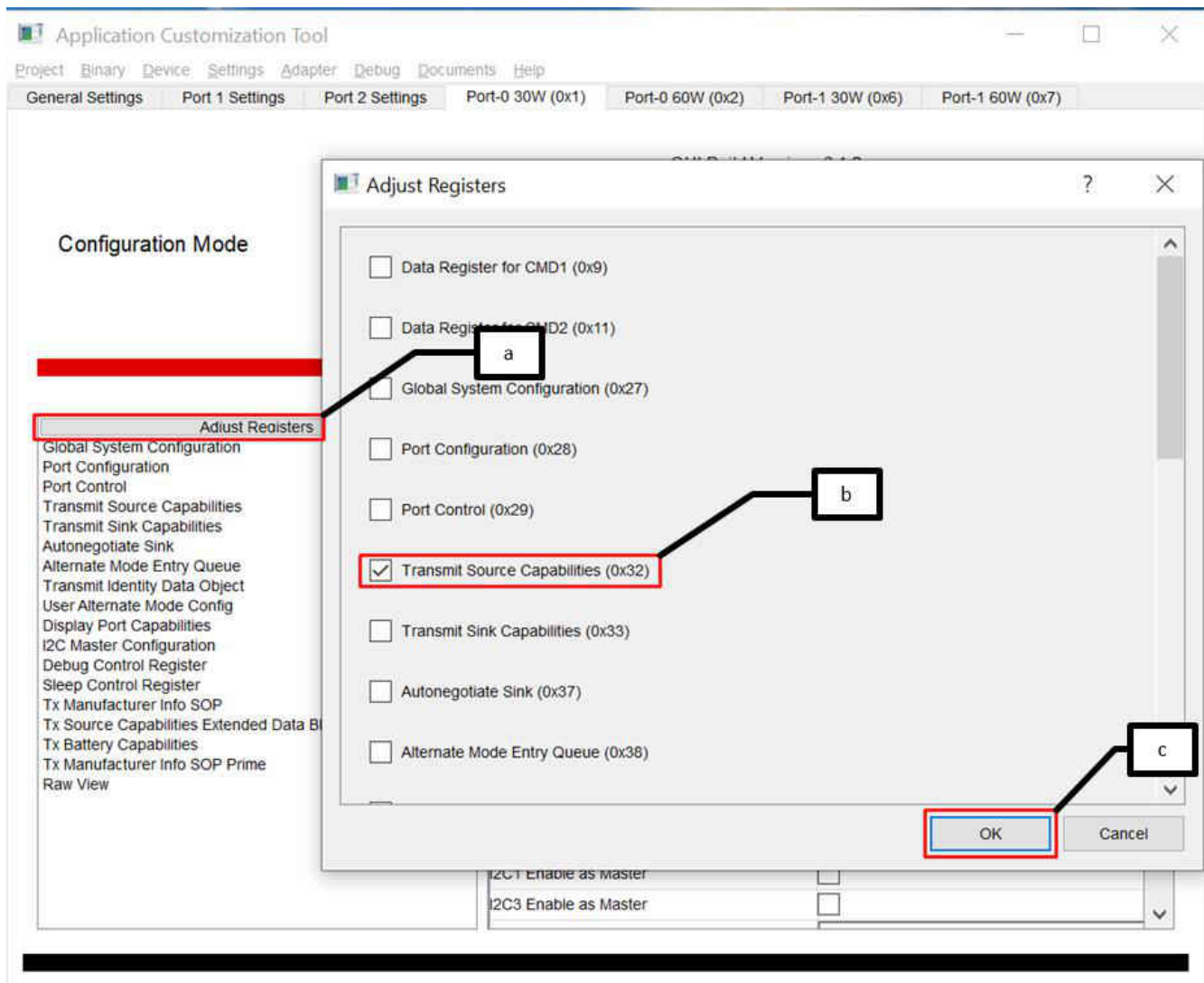


图 2-10. 选择 Transmit Source Capabilities (传输拉电流能力) 寄存器

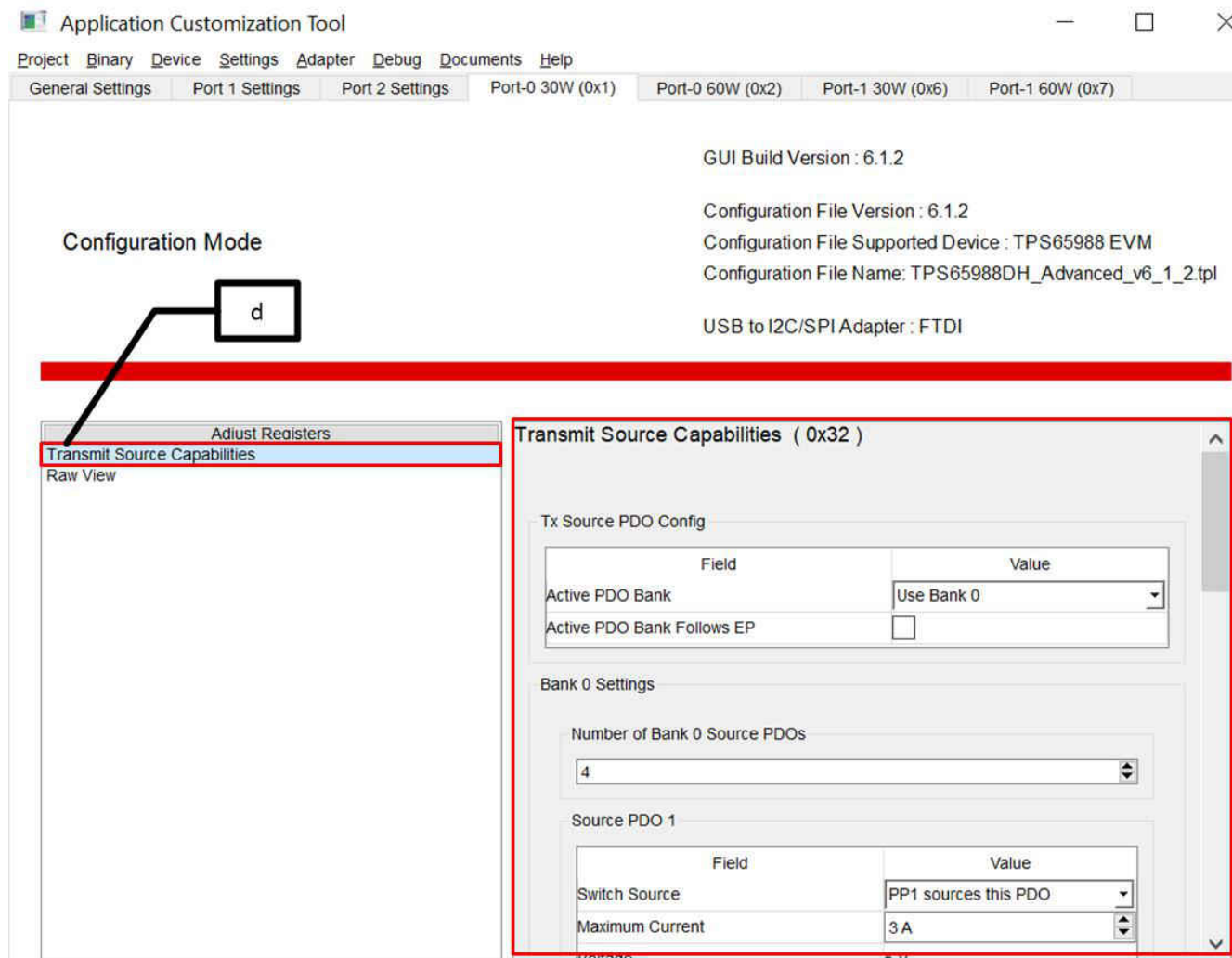


图 2-11. 配置 Transmit Source Capabilities (传输拉电流能力)

6. 类似地，为引用此应用附带的 .pjt 文件的剩余虚拟地址创建条目。
7. 将应用配置和 GPIO 事件映射到相应的 GPIO，如图 2-12 中所示。
 - a. 选择 *IO Config* (IO 配置) 寄存器。
 - b. 映射每个 GPIO 的事件。有关 GPIO 2 和 3，请参阅工程文件。

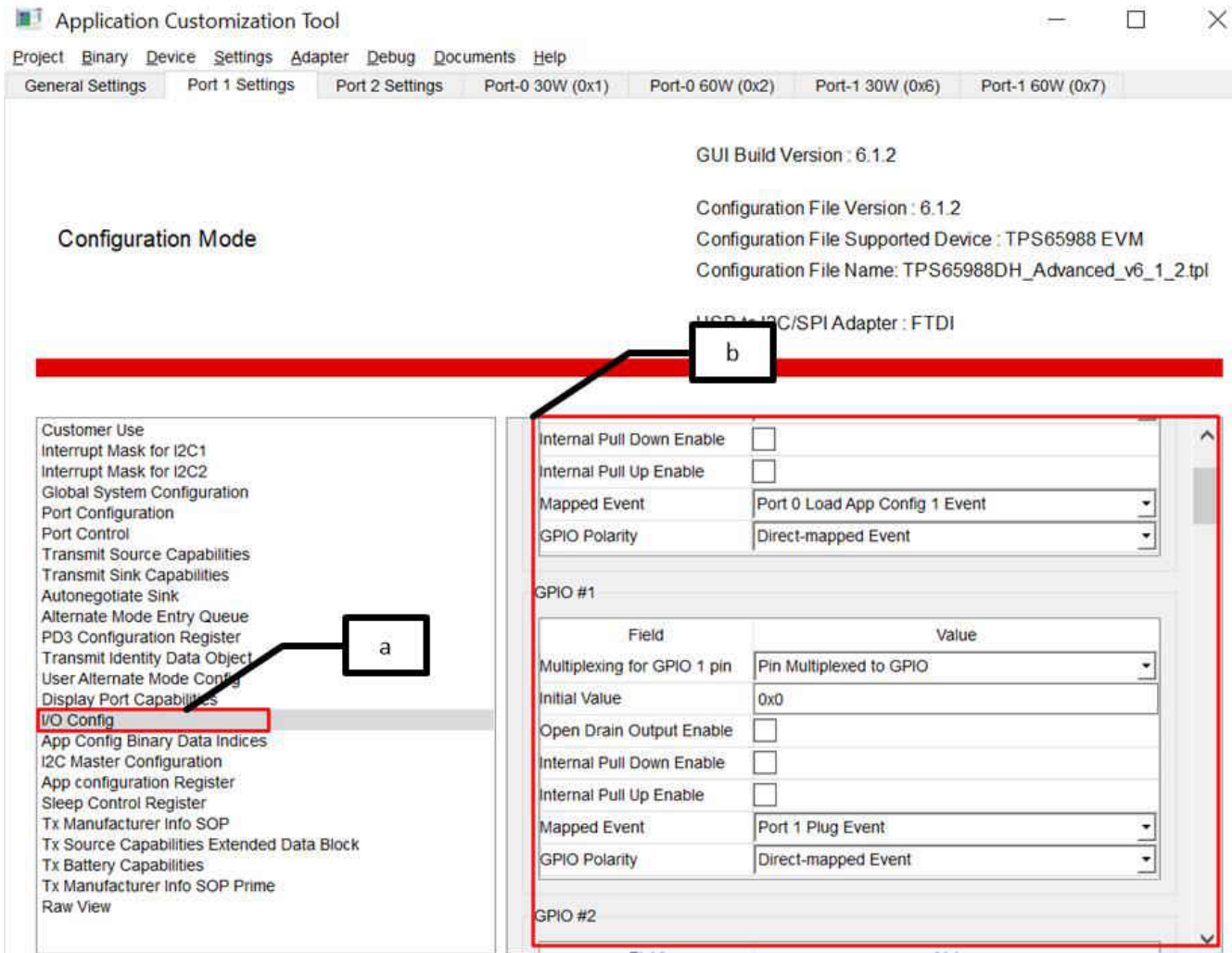


图 2-12. GPIO 映射

2.6 测试设置和结果

可以使用工程文件在 TPS65988EVM 上测试平衡端口功率的控制逻辑 (如图 2-6 中所示)。TPS65988EVM 具有两个降压稳压器 (LM3489)，对应于端口 A 和端口 B，如图 2-13 中所示。GPIO 引脚 GPIO12 和 GPIO13 分别映射至输出 GPIO 事件 *Port 0 Source PDO Negotiated TT1* 和 *Port 0 Source PDO Negotiated TT2* 事件。这些 GPIO 基于协商的 PDO 进行切换，并相应地设置 LM3489 的反馈电压，以生成协商的 PDO 电压。同样，端口 B (端口 1) 上的电压由 GPIO14 和 GPIO15 控制。在实际应用中，降压稳压器应更换为交流/直流和直流/直流稳压器，如图 2-13 中所示。TPS65988DH 包括三个 I2C 端口，其中一个 I2C 端口可以同时用作主端口和从端口，另一个 I2C 端口只能用作 I2C 主端口，第三个 I2C 端口只能用作 I2C 从端口。这些 I2C 主端口使 PD 控制器能够根据 PD 控制器内的事件直接控制各种从端口。I2C 主端口事件可用于配置具有 I2C 接口的交流/直流或直流/直流器件。

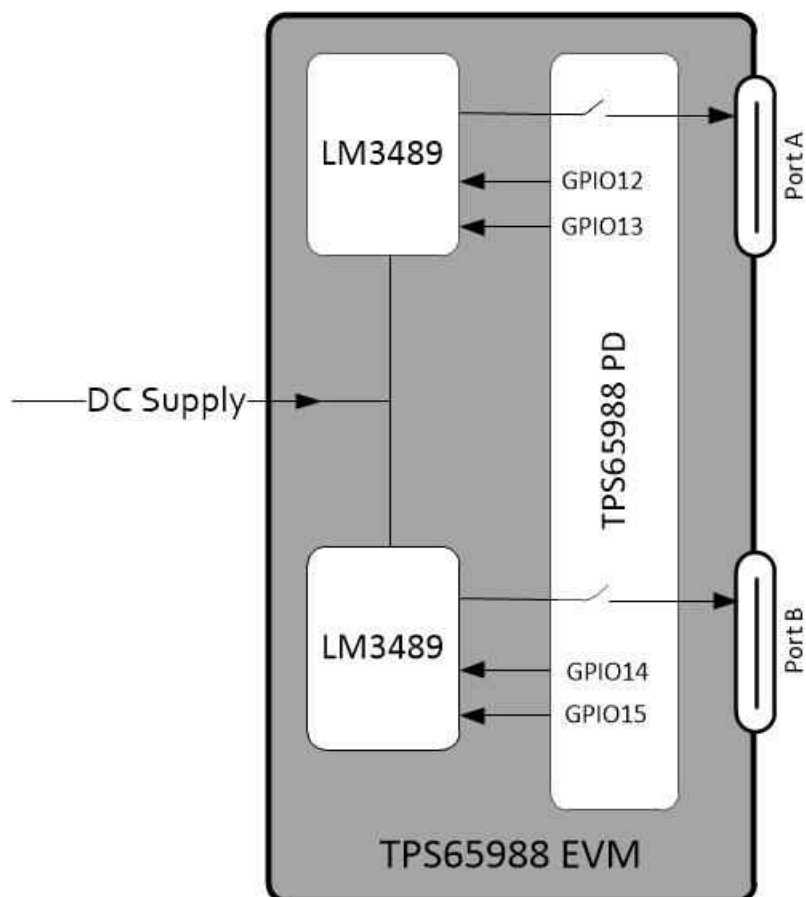


图 2-13. EVM 方框图

请按照以下步骤准备 EVM，然后测试端口功率平衡控制逻辑。

1. 填充 0E 电阻器 R170-R173 和 R133, 使 GPIO0-GPIO3 信号在信号头 J3 和 J4 上可用。
2. 使用跳线将 GPIO0 (J4 上) 短接至 GPIO1 (J3 上), 将 GPIO2 (J4 上) 短接至 GPIO3 (J4 上) 。

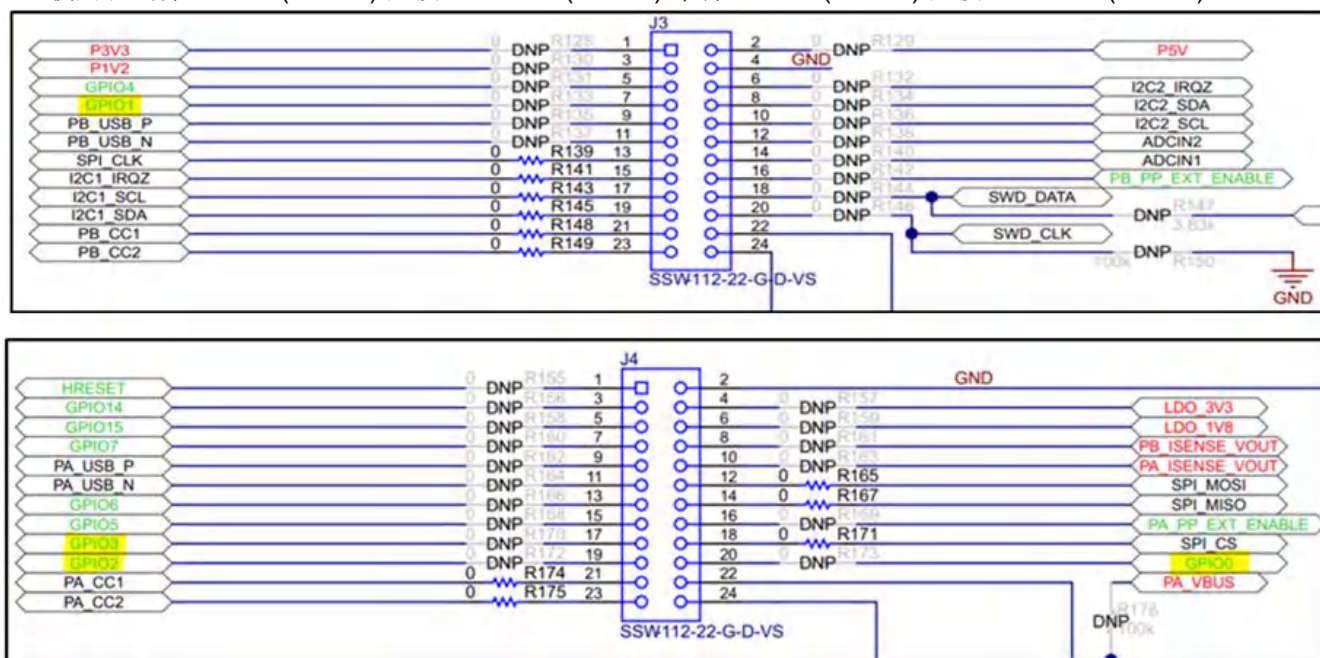


图 2-14. EVM 上的 GPIO 设置

3. 填充 PPHV 跳线，将降压稳压器的输出连接到内部电源开关的系统侧。短接 J11 的引脚 5-7 和 6-8。
4. 通过将电源适配器连接到桶形插孔连接器 J1，为 EVM 供电。
5. 在 GUI 软件工具中加载工程文件，并在 PD 控制器中加载固件。
6. 通过拔下然后再插入电源适配器，使 EVM 重新通电。
7. 通过 PD 分析仪将支持 PD 的灌电流器件连接到其中一个端口。TPS665988DH 拉电流端口必须广播 60W 容量；检查拉电流能力消息，确保前述事项。
8. 将另一个 PD 器件连接到第二个端口，并验证已连接的端口是否广播了修改后的 30W 拉电流能力消息。

图 2-15 显示了在端口 0 上捕获的 PD 布线。在 t1 - 仅连接端口 0，因此拉电流能力消息显示 60W。在 t2 - 端口 1 也已连接，因此端口 0 将其功率容量缩小到 30W。图中还显示了从 t2 端口 0 传输的修改后的 30W 拉电流能力消息。

Role	Message	Data
	PD	
Source:DFP ↓	✓ [2]Source_Cap	SOP H=0x45A1 0x2B01912C 0x0002D12C 0x0004B12C 0x0006412...
Source:DFP ↓	BMC	01...
Source:DFP ↓	PD Header	MsgId=2 Msg=Source_Cap ObjCounts=4
Source:DFP ↓	PD Data 0	Pos=1 Type=Fixed FixedVol=5.00V MaxCur=3.00A
Source:DFP ↓	PD Data 1	Pos=2 Type=Fixed FixedVol=9.00V MaxCur=3.00A
Source:DFP ↓	PD Data 2	Pos=3 Type=Fixed FixedVol=15.00V MaxCur=3.00A
Source:DFP ↓	PD Data 3	Pos=4 Type=Fixed FixedVol=20.00V MaxCur=3.00A
Sink:UFP ↑	[2]GoodCRC	SOP H=0x0441 CRC=0xAFD6A8A2 EOP
Sink:UFP ↑	[0]Request	SOP H=0x1082 0x4384B12C CRC=0x1C184A36 EOP
Source:DFP ↓	[0]GoodCRC	SOP H=0x0161 CRC=0x4A38788F EOP
Source:DFP ↓	[3]Accept	SOP H=0x07A3 CRC=0x5A976876 EOP
Sink:UFP ↑	[3]GoodCRC	SOP H=0x0641 CRC=0x41D8C98E EOP
Source:DFP ↓	[4]PS_RDY	SOP H=0x09A6 CRC=0xC058B134 EOP
Sink:UFP ↑	[4]GoodCRC	SOP H=0x0841 CRC=0xA660E489 EOP
Source:DFP ↓	[5]VDM:DiscIdentity	SOP H=0x1BAF 0xFF00A001 CRC=0x027E7183 EOP
Sink:UFP ↑	[5]GoodCRC	SOP H=0x0A41 CRC=0x486E85A5 EOP
Sink:UFP ↑	[1]VDM:DiscIdentity	SOP H=0x428F 0xFF00A041 0xC4000451 0x00000000 0x00000712...
Source:DFP ↓	[1]GoodCRC	SOP H=0x0361 CRC=0xA43619A3 EOP
Source:DFP ↓	[6]VDM:DiscSVID	SOP H=0x1DAF 0xFF00A002 CRC=0x9F8B2BCD EOP
	PD	
Sink:UFP ↑	[6]GoodCRC	SOP H=0x0C41 CRC=0xA10D2090 EOP
Sink:UFP ↑	[2]VDM:DiscSVID	SOP H=0x248F 0xFF00A042 0xFF010000 CRC=0xF9F7E6EB EOP
Source:DFP ↓	[2]GoodCRC	SOP H=0x0561 CRC=0x4D55BC96 EOP
Source:DFP ↓	✓ [7]Source_Cap	SOP H=0x4FA1 0x2B01912C 0x0002D12C 0x0004B12C 0x0006409...
Source:DFP ↓	BMC	01...
Source:DFP ↓	PD Header	MsgId=7 Msg=Source_Cap ObjCounts=4
Source:DFP ↓	PD Data 0	Pos=1 Type=Fixed FixedVol=5.00V MaxCur=3.00A
Source:DFP ↓	PD Data 1	Pos=2 Type=Fixed FixedVol=9.00V MaxCur=3.00A
Source:DFP ↓	PD Data 2	Pos=3 Type=Fixed FixedVol=15.00V MaxCur=2.00A
Source:DFP ↓	PD Data 3	Pos=4 Type=Fixed FixedVol=20.00V MaxCur=1.50A
Sink:UFP ↑	[7]GoodCRC	SOP H=0x0E41 CRC=0x4F0341BC EOP
Sink:UFP ↑	[3]Request	SOP H=0x1682 0x43825896 CRC=0x11FE5DC1 EOP
Source:DFP ↓	[3]GoodCRC	SOP H=0x0761 CRC=0xA35BDDBA EOP
Source:DFP ↓	[0]Accept	SOP H=0x01A3 CRC=0xB3F4CD43 EOP
	PD	
Sink:UFP ↑	[0]GoodCRC	SOP H=0x0041 CRC=0xA8BB6CBB EOP
Source:DFP ↓	[1]PS_RDY	SOP H=0x03A6 CRC=0x208D582A EOP
Sink:UFP ↑	[1]GoodCRC	SOP H=0x0241 CRC=0x46B50D97 EOP

图 2-15. 显示对应于单端口连接和双端口连接的 PDO 的 PD 布线

图 2-16 显示了与 PD 布线并行捕获的端口 0 (通道 1) 和端口 1 (通道 2) Vbus 电压转换。通道 2 显示端口 1 VBU 转换为 20V。

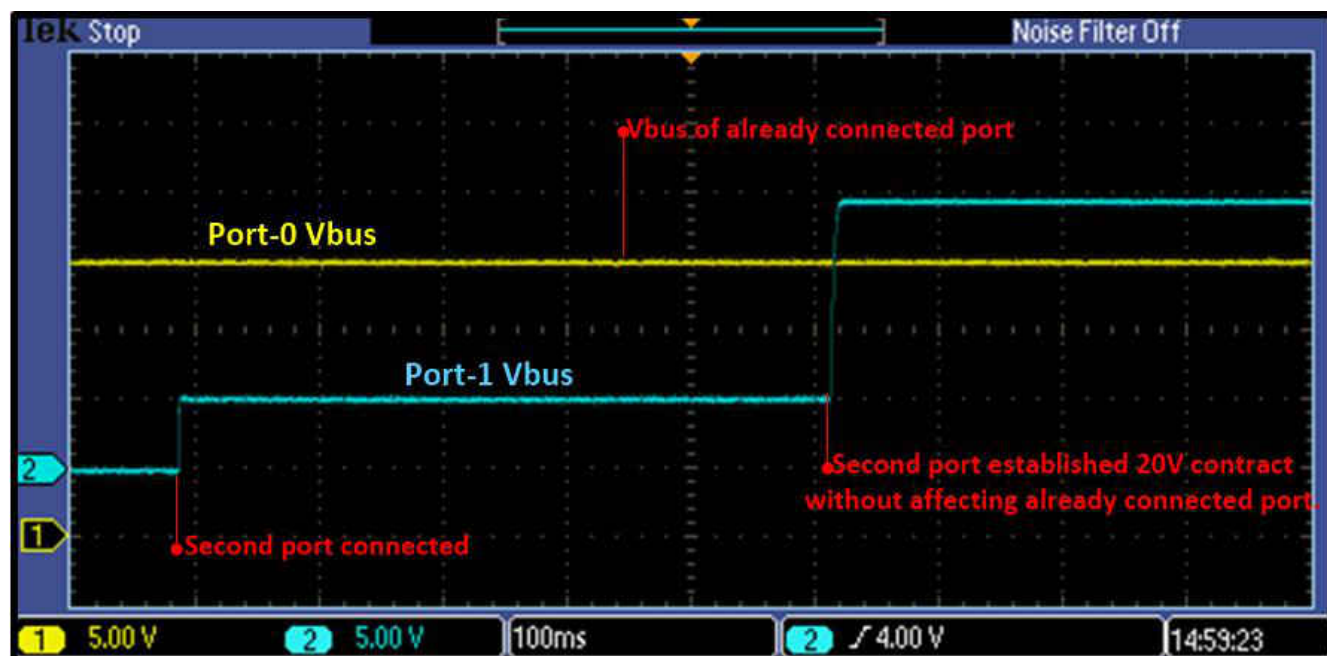


图 2-16. Vbus 转换的示波器捕获

3 参考文献

- 德州仪器 (TI) [TPS65987D GPIO 事件应用报告](#)。
- 德州仪器 (TI) [在 TPS65987D 和 TPS65988 PD 控制器中使用 I2C 主器件应用报告](#)。
- 德州仪器 (TI) [具有集成式电源开关的双端口 USB Type-C™ 和 USB PD 控制器数据表](#)。

4 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (May 2021) to Revision A (December 2023)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 添加了作者姓名.....	1

重要声明和免责声明

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、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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司