

USB Type-C PD 的电源功率控制

Yadong Duan

摘要

USB Type-C PD 作为一种常用的外设接口，集成了功率与数据的通信功能，但客户在实际应用中仍面临诸多挑战。随着设备对供电需求的日益复杂，本文基于 TI 的 TPS6599x 和 TPS6699x 系列控制器，介绍了 USB Type-C PD 控制器在源端（Source）和接收端（Sink）模式下的电源配置与功率管理，以及如何实现虚拟高功率传输，从而帮助客户更好地实现电源功率的控制、管理与传输。

Contents

1	TPS6X99x 系列的电源配置.....	2
2	TPS6X99x 系列的功率管理.....	4
3	TPS6X99x 系列如何实现高功率传输	7
4	USB Type-C PD 电源问题的总结	8

1 TPS6X99x 系列的电源配置

1.1 USB power 的定义

根据 USB-IF 协会的规定，源端（Source）与接收端（Sink）之间的连接建立主要依赖于 CC 引脚的上拉电阻（Rp）和下拉电阻（Rd）。USB 协议规定，上拉电阻端（Rp）作为源端（Source），而下拉电阻端（Rd）则作为接收端（Sink）。

在初始连接状态下，源端（Source）的 CC1 和 CC2 引脚连接上拉电阻（Rp），接收端（Sink）的 CC1 和 CC2 引脚连接下拉电阻（Rd）。源端与接收端通过终端检测电路来确认连接状态。当 CC 引脚建立有效连接后，源端即可通过电源总线向接收端供电，如 Figure 1 所示

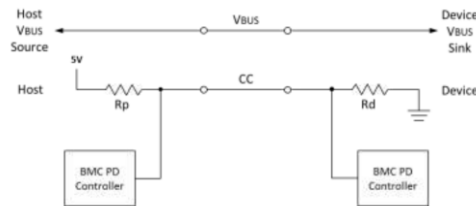


Figure 1. 通过 CC 引脚定义 VBUS 方向

源端的上拉电阻（Rp）还决定了 Type-C 接口在连接状态下的电流等级，如 Figure 2 所示。不同的上拉电阻（Rp）及其搭配的上拉电压，决定了源端在 Type-C 协议下的功率输出能力。

Source Advertisement	Current Source to 1.7 - 5.5 V	Resistor pull-up to 4.75 - 5.5 V	Resistor pull-up to 3.3 V ± 5%
Default USB Power	80 μ A ± 20%	56 k Ω ± 20% (Note 1)	36 k Ω ± 20%
1.5 A @ 5 V	180 μ A ± 8%	22 k Ω ± 5%	12 k Ω ± 5%
3.0 A @ 5 V	330 μ A ± 8%	10 k Ω ± 5%	4.7 k Ω ± 5%

Figure 2. 源 CC 终端 上拉(Rp) 要求

此外，在 Type-C 协议基础上，USB-IF 还进一步定义了 Type-C PD 协议，如 Figure 3 所示。以笔记本电脑应用为例，下表列出了固定电压的功率范围。按照协议划分，主要分为 SPR（标准功率范围）和 EPR（扩展功率范围）。SPR 的标准电压包括 5V、9V、15V 和 20V，最大电流为 5A，可实现最高 100W 的充电功率。EPR 则在 SPR 基础上新增了 28V、36V 和 48V 电压等级，最大电流同样为 5A，可实现最高 240W 的充电功率。

Power Range	Available Current and Voltages	PDP Range
Standard Power Range (SPR)	3A: 5V, 9V, 15V, 20V	15 - 60W
	5A: 20V	>60 - 100W
Extended Power Range (EPR)	3A: 5V, 9V, 15V, 20V	15 - 60W
	5A: 20V	>60 - 100W
	5A2: 28V, 36V, 48V	>100 - 240W

Figure 3. 固定电压范围

1.2 TPS6X99x 寄存器的电源设定

电源设定分为源端（Source）和接收端（Sink）两种模式。Type-C 的电流配置如 Figure 4 所示。TPS6X99x 支持 USB 默认电流、1.5A 和 3A 配置，系统可根据 Type-C 的功率要求进行配置，实现 7.5W 或 15W 的功率输出能力。

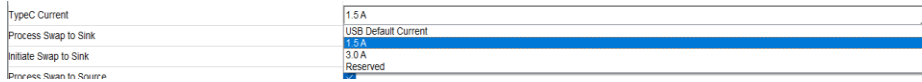


Figure 4. 固定电压范围

Type-C PD 源端(source)的固定电压范围设定如 Figure 5 所示，通过增加源端(source)的数量来调整 SPR(Standard Power Range) 协议和 extended power range (EPR)的电压等级和电流值。通过增加'Number valid PDOs'来增加 SPR 的不同电压等级。通常 notebook 的适配器的源端(source)的类型主要为固定型，峰值电流根据系统的电源能力设定。增加'Source num valid EPR PDOs'的值来增加 EPR 的电压等级，和系统所能支持的电流。对于 SPR 和 EPR 都需要开启外部的 GPIO 来控制外部源端(source)的路径。

Type-C PD 源端（Source）的固定电压范围设定如 Figure 5 所示，通过增加源端数量来调整 SPR 和 EPR 的电压等级和电流值。通过设置“Number valid PDOs”可增加 SPR 的不同电压等级。通常，笔记本电脑适配器的源端类型主要为固定型，峰值电流根据系统的供电能力设定。增加“Source num valid EPR PDOs”的值可扩展 EPR 的电压等级及系统支持的电流。对于 SPR 和 EPR，均需开启外部 GPIO 来控制源端的供电路径。

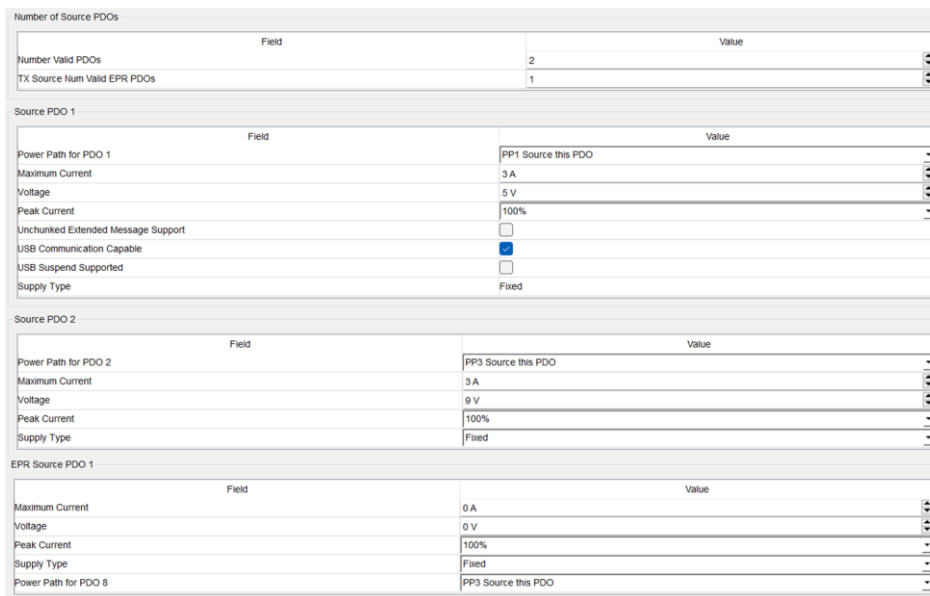


Figure 5. 源端（Source）功率配置

接收端（Sink）的电压配置如 Figure 6 所示，与源端配置类似，也是通过“Number valid PDOs”来增强对 SPR 和 EPR 的支持能力，并可根据笔记本电脑的应用需求开启可接受的电

压水平。例如，若笔记本支持 5V、20V 和 48V，可将“Number valid PDOs”配置为 2，分别设置 5V 和 20V 电压水平；同时将“Sink num valid PDOs”配置为 1，开启 48V 电压水平。这样，笔记本即可与适配器协商 5V、20V 或 48V 的电压。

Number of Sink PDOs	
Field	Value
Number Valid PDOs	2
TX Sink Num Valid EPR PDOs	1
Sink PDO 1	
Field	Value
Operating Current	3 A
Voltage	5 V
Peak Current	100%
Fast Role Swap required USB Type-C Current	FRS Not Supported
Higher Capability	<input checked="" type="checkbox"/>
Supply Type	Fixed
Sink PDO 2	
Field	Value
Operating Current	3.25 A
Voltage	20 V
Peak Current	100%
Supply Type	Fixed
EPR Sink PDO 1	
Field	Value
Operating Current	5 A
Voltage	48 V
Peak Current	100%
Supply Type	Fixed

Figure 6. 接收端（Sink）功率配置

2 TPS6X99x 系列的功率管理

当前各类设备在使用 Type-C PD 控制器时，会根据系统功率需求动态调节所支持的电压水平，从而管理系统功率。本文主要介绍 TPS6599x 和 TPS6699x 的两种常用功率管理方案。

第一种方案是通过系统嵌入式软件（如 TI 的 M0 MCU）来控制 and 修改 TPS6599x 和 TPS6699x 系列的 0X32 和 0X33 寄存器。例如，若系统原支持 5V/9V/15V/20V 电压水平，最大功率为 100W，后因系统功率变化，仅需支持 5V/9V，最大功率降至 27W，则可按以下步骤进行调整：

第一步：EC 读取 0X33 寄存器，判断当前电压与功率水平。

第二步：EC 将“Number valid PDOs”的值从 4 修改为 2，如 Figure 7 所示。

第三步：修改完成后，EC 发送自动协商接收器更新指令，重新构建电压与功率的协商。

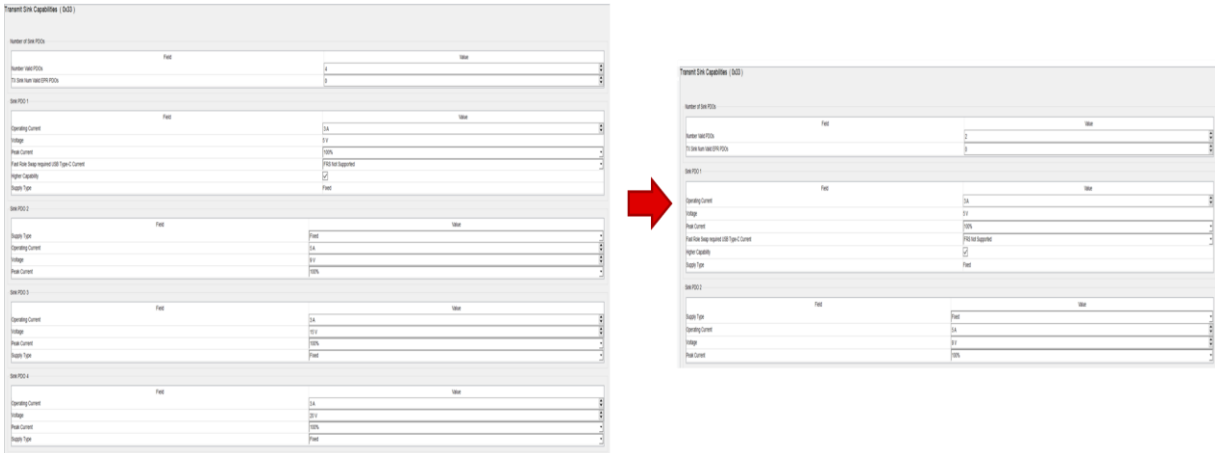


Figure 7. 寄存器配置

EC 完成配置之后，新的协商过程如 Figure 8 所示，TPS6599x 和 TPS6699x 系接收到指令后发送 9V 的 request，适配器改变输出电压，将 20V 的电压切到 9V，并发送 PS_RDY，完成协商。

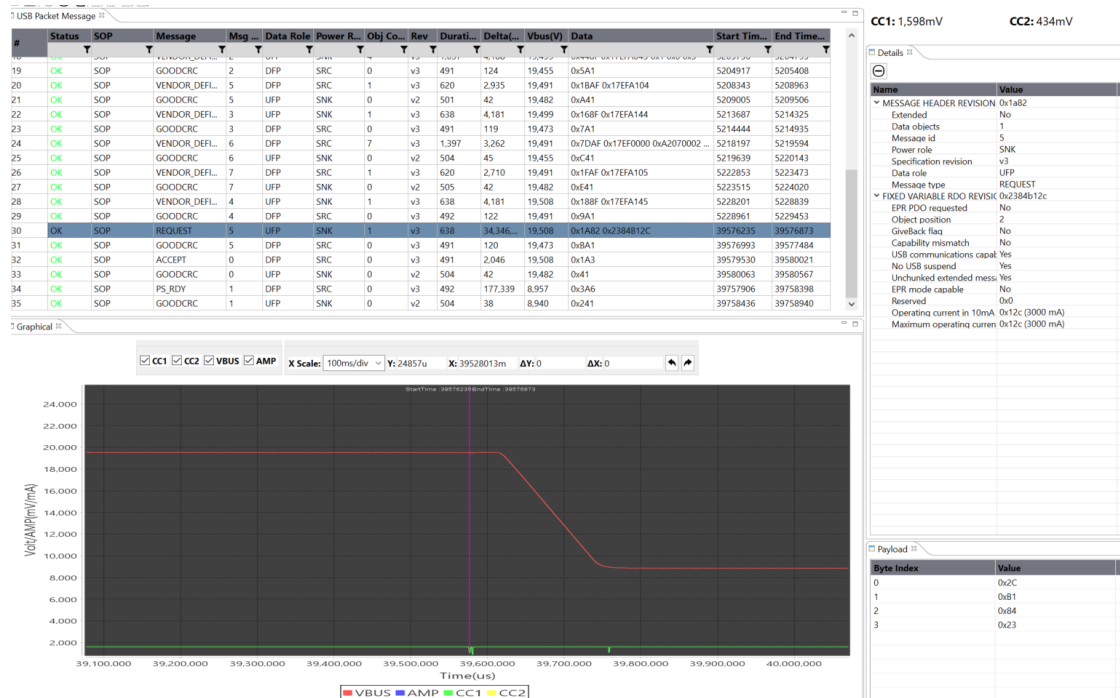


Figure 8. 20V 切换 9V 协商过程

若系统需恢复支持 5V/9V/15V/20V 电压水平，最大功率为 100W，EC 可恢复原有配置。完成后，协商电压将从 9V 切换回 20V，如 Figure 8 所示。

第一步：EC 读取 0X33 寄存器，确认当前电压与功率水平。

第二步：EC 修改 0X33 寄存器的电压挡位信息，重新添加 20V 电压挡位。

第三步：与前述相同，发送自动协商指令，进行 20V 电压与功率的协商。如 Figure 9 所示，电压会从 9V 切换到 20V。

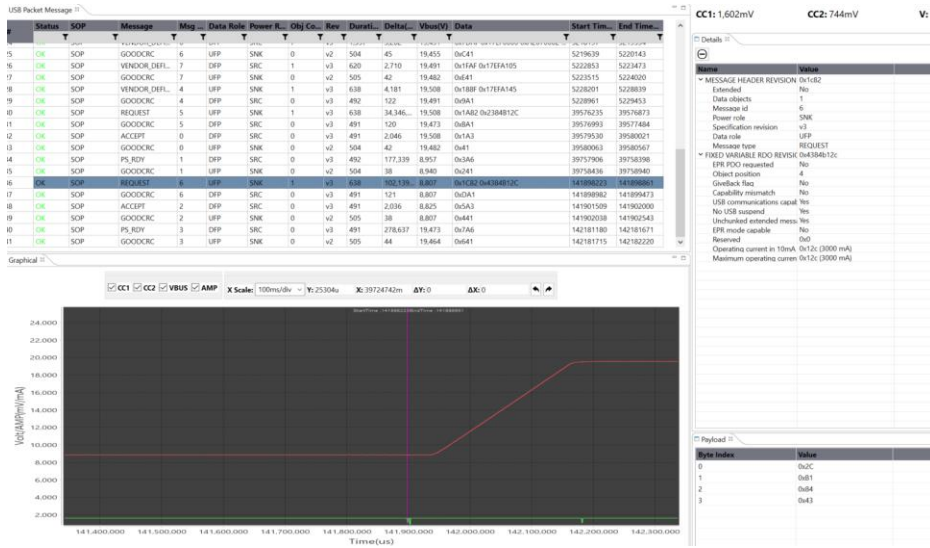


Figure 9. 9V 切换 20V 协商过程

第二种方案是针对 TPS65994 和 TPS66994 双端口 Type-C PD 控制器的简单电源管理（SPM）功能。该方案适用于双端口作为源端（Source）且无法同时输出 15W 功率的情况，可通过 SPM 功能限制功率输出。具体控制方式如 Figure 10 所示，当其中一个端口已协商 15W 高功率时，另一个端口的电流将根据设定的限制值进行协商，从而限制双端口的对外输出能力。相关寄存器配置如下

开启 SPM 功能寄存器和电流限制寄存器配置：

GLOBAL_SYSTEM_CONFIG.EnableSPM = 1b (Enable SPM)

GLOBAL_SYSTEM_CONFIG.MinimumCurrentAdvertisement = 1.5A

PORT_CONTROL.TypeCCurrent = 0.9A (USB Default Current)

GLOBAL_SYSTEM_CONFIG	PORT_CONTROL	PortX status	Port Y	
MinimumCurrentAdvertisement	TypeCCurrent		Implicit Contract	Explicit Contract
UsbDefaultCurrent	0.9A	"high power": Explicit contract for 5V with > 0.9A.	0.9A	5V up to 0.9A
	1.5A		0.9A	
	3.0A		0.9A	
1.5A	0.9A	"low power": Explicit contract for 5V with ≤ 1.5A or an implicit contract.	0.9A	5V up to 3.0A
	1.5A		1.5A	
	3.0A		3.0A	
UsbDefaultCurrent	0.9A	"low power": Explicit contract for 5V with ≤ 0.9A or an implicit contract.	0.9A	
	1.5A		1.5A	
	3.0A		3.0A	

Figure 10. 双端口的简单电源管理

3 TPS6X99x 系列如何实现高功率传输

USB Type-C PD 协议规定了端口间的功率范围：SPR 最高支持 100W，而 EPR 最高支持 240W，这在一定程度上限制了应用的灵活性。为提高 Type-C PD 电源的灵活性，本章节将介绍如何通过 TPS6X99x 系列在 SPR 和 EPR 协议下实现更高功率的传输。

USB Type-C PD 通过电源数据对象（PDO）定义最大电流、峰值电流和电压等级。协议规定了源端与接收端之间协商的最大电流。若源端将其供电能力与最大电流提升至峰值电流，而接收端能够识别该峰值电流并将其作为最大功率接收，则可实现超出 USB Type-C PD 协议标准的高功率传输。

实现虚拟高功率方案的整体框架如 Figure 11所示。源端 TPS6X99x 通过 I2C 控制 DC-DC 转换器，支持高功率模式下的电压与电流输出；接收端同样通过 I2C 控制 DC-DC 转换器，以实现高功率模式。当源端与接收端通过 CC 引脚建立协商后，PD 控制器会通过 GPIO 分别开启源端路径和接收端路径。

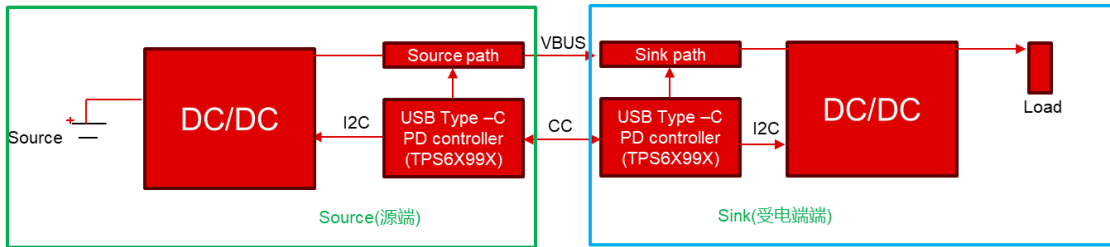


Figure 11. 虚拟高功率协议架构图

例如，若源端 TPS6X99x 支持 5V/3A 和 15V/3A，且峰值电流可达 5A（USB Type-C PD 协议规定 15V 仅支持 3A），而接收端最大功率支持 15V/5A（75W）。源端与接收端通过 CC 引脚协商 15V 电压挡位后，源端 TPS6X99x 通过配置 I2C 事件 “I2C CNTLR EVENT SRC PDOX” 控制 DC-DC 输出 15V/5A；接收端则通过配置 I2C 事件 “I2C CNTLR EVENT SNK PDOX” 控制 DC-DC 接收 15V/5A 的功率（I2C 配置事件如 Figure 12所示）。

Record index 1 (0x1)	
Field	
Trigger Event	I2C_CNTLR_EVENT_SRC_PDO1_NEGOTIATED
Record index 1 (0x1)	
Field	
Trigger Event	I2C_CNTLR_EVENT_SNK_PDO1_NEGOTIATED

Figure 12. I2C功率配置事件

（当源端与接收端协商为 15V/3A 时，源端通过 I2C 事件配置 DC-DC 输出 15V/5A，接收端也相应配置为接收 15V/5A，从而实现超出协议标准的高功率传输。

4 USB Type-C PD 电源问题的总结

本文基于常见工作场景，介绍了电源功率管理与高功率协商的方法。第二章针对不同应用场景提供了功率管理方案：第一种方法适用于端口作为接收端时，系统可根据自身功率需求动态调节并协商合适的功率水平；第二种方法适用于端口作为源端时，若双端口无法同时输出 15W，可启用 SPM 功能以限制功率输出。第三章则针对协议限制，提出了实现高功率传输的策略，在特殊场景下支持超出协议标准的功率需求，提升了使用的灵活性。

参考文献

[1] TPS6699X/TPS6599X Datasheet, Dual Port USB Type-C and USB PD Controller with Integrated Source Power Switches, Texas Instruments.

[2] Universal Serial Bus Power Delivery Specification 3.2

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