

Part1: USB Type-C 控制器如何支持 AMD 平台 USB4 功能

Yadong Duan

摘要

USB Type-C 接口在 AMD 平台中同时承担电力传输、数据通道建立及高带宽视频输出，其 USB4 功能的正常工作依赖于 Type-C/PD 控制器、AMD APU 的 Crossbar 配置机制以及外部 Re-timer 的协同。本文基于 TI TPS6X99X 系列 Type-C/PD 控制器，系统性介绍 USB4 模式从 PD 层触发、AMD 平台寄存器（Type-1/3/5）交互、Crossbar 状态管理到 Re-timer I²C 事件编程的完整流程。文中通过三个常见问题场景（无法进入 USB4、未成功触发 AMD 平台配置、未配置 Re-timer）给出调试方法，分析 PD 与 AMD 平台之间通信不匹配、模式切换时序错误以及 Re-timer 未配置导致链路训练失败的典型根因。最终帮助在 AMD 平台上实现 USB3.x/USB4 端口的功能验证、问题定位与量产配置提供参考。

Contents

1	AMD 平台和重新定时器（Re-timer）的 I2C 配置机制.....	2
2	USB4 协议沟通流程.....	4
3	USB Type-C PD 控制器配置 USB 模式（AMD 平台）.....	5
4	USB Type-C PD 配置 AMD 平台 USB 4 功能的总结	10

1 AMD 平台和重新定时器（Re-timer）的 I2C 配置机制

1.1 系统架构概述

AMD 平台和 USB Type-C PD 控制器架构如 Figure 1 所示（Charger: BQ25720; PD controller: TPS6599X; CC OVP: TPD4S311）。USB Type-C PD 控制器的 I2C1/2 为从设备，I2C3 为主设备。USB Type-C PD 控制器通过 I2C3 将信息汇报给 AMD 的平台。

在 AMD 平台上，USB4 数据链路的建立依赖三者协同：USB Type-C PD 控制器（TPS6X99X）通过 CC 检测到连接，并判断出设备的角色（谁是源端 (Source)，谁是设备受电端 (Sink)）以及插头的方向，并通过电源协商流程建立电力连接水平。建立成功后，USB Type-C PD 控制器根据数据通信识别出设备的类型，并将详细的信息会报告 AMD 的 APU。

AMD 平台为识别设备的类型，通过 I2C 连接 USB Type-C PD 控制器进行通信，提供 Type-1（类型）/ Type-3（类型 2）/ Type-5（类型 5）结构化寄存器来控制管理 AMD APU 的 Crossbar MUX 切换与 USB4 链路初始化过程。

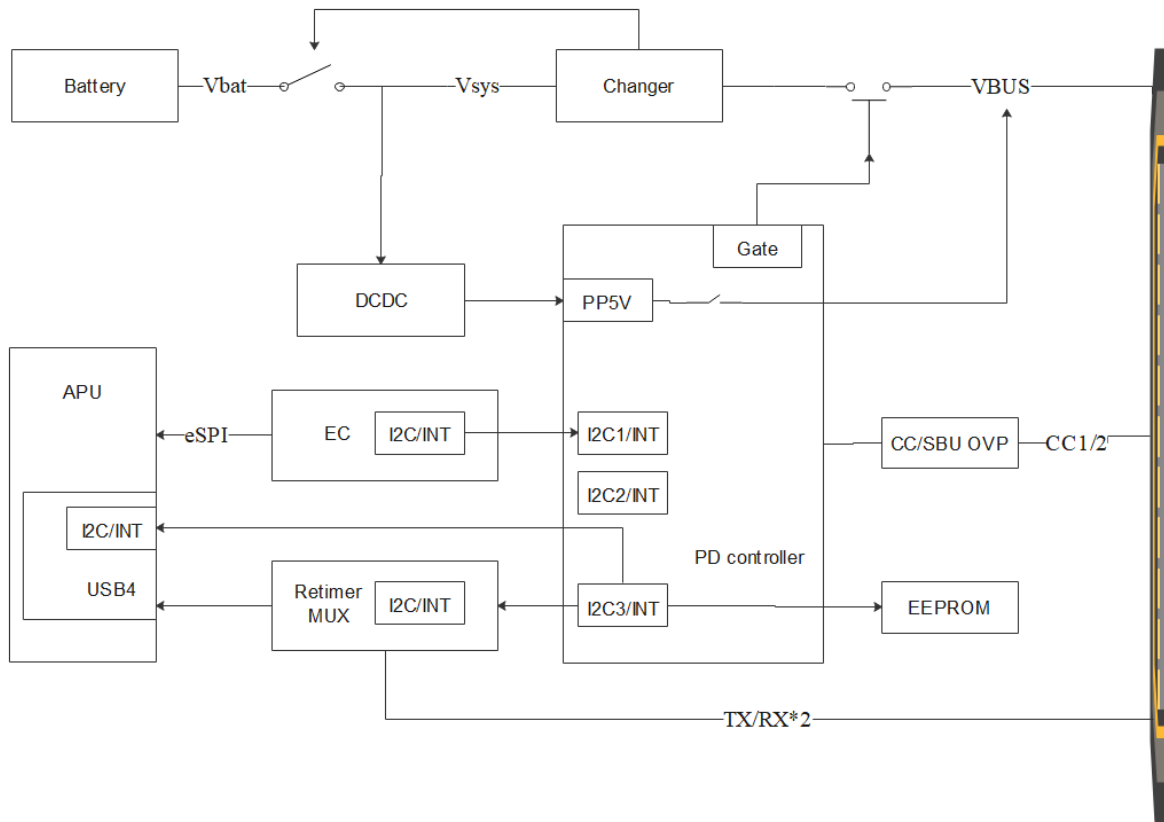


Figure 1. USB Type-C PD 架构图

1.2 AMD 的 I2C 协议寄存器配置

AMD 平台通过 I2C 与 Type-C/PD 控制器通信，PD 控制器作为 I2C Host 访问 AMD 平台的指定寄存器。该协议依赖以下三类结构化寄存器：

1. 类型 1（Type-1 寄存器，配置命令，只写（Write-Only）），主要用于 PD 控制器向 AMD 上报端口状态，包含正反插（Orientation），线缆速率（Cable speed）和类型（Cable type（Passive/Active）），数据角色（DFP 和 UFP）。
2. 类型 3（Type-3 寄存器，读取命令结果，只读（Read-Clear））主要是 USB Type-C PD 控制器读取该寄存器以获取上一条 Type-1 命令的执行结果清除 AMD 平台的中断保持，并确认准备好接收下一条命令。
3. 类型 5（Type-5 寄存器，读写状态寄存器，只读（Read-Only））主要是 USB Type-C PD 控制器获取当前状态，例如交叉状态（Crossbar）、中断状态和指令执行情况。

其次，AMD 平台使用的 I2C 中断机制：USB Type-C PD 控制器写类型 1（Type-1 寄存器），AMD 平台拉低中断，控制器读取 Type-5（查询状态），再读取 Type-3 确认执行并清除中断），在此过程可以确保中断不会残留，并不会阻塞下一条写入，保证 AMD 平台的交叉模式（Crossbar）和重新定时器（Re-timer）配置的顺序性，如 Figure2 所示。

AMD 平台要求所有数据通道切换（USB3/USB4）必须经过安全模式（Safe State）→ 新模式，主要是 AMD 平台和重新定时器（Re-timer）的路径必须保证在无数据传输状态下切换，避免通道损坏或训练失败。标准流程如下：

1. 写类型 1（Type-1）请求进入安全模式（Safe State）
2. 读类型 5（Type-5）确认读取安全状态（Crossbar）态信息
3. 如果安全状态（Crossbar）态信息切换正确。读类型（Type-3）清中断，允许下一条命令
4. 执行 USB3/USB4 模式的配置（重新定时器配置也在此步骤）
5. 再写类型 1（Type-1）请求进入目标模式（USB3/4）
6. 重复 Type-5/Type-3 回读流程

最终实现 AMD 平台和 USB4 设备的正确的链路连接。



Figure 2. USB Type-C PD 配置流程

1.3 重新定时器（Re-timer）配置机制

笔记本的 USB Type-C 的接口端和 AMD 平台传输高速信号时，会遇到 PCB 板的铜线和线缆传输造成的信号衰减，PCB 走线间的相邻干扰和信号传输过程中的时序干扰造成的抖动等导致传输速率下降，严重情况下无法建立稳定的高速连接。为避免出现该问题，USB Type-C 的接口端和 AMD 平台端会使用重新定时器（Re-timer）。整体架构如 Figure1 所示。

重新定时器（Re-timer）为配合 AMD 平台实现不同模式的数据类型的连接，不仅按照协议要求建立 USB3.x/USB4 等模式，还会配合建立安全模式。配置流程也是符合 AMD 平台的时序，配置模式间的切换必须要始终先切换到安全模式，配置如 AMD USB Power Delivery I2C Target Programming Guide for APU 所示。

2 USB4 协议沟通流程

USB Type-C 接口协议默认位 USB3 模式连接，如双方设备和线缆支持 USB4 模式会进入到 USB4 模式的连接。USB4 协议沟通如 Figure3 所示，详细的配置流程主要分为三步。

第一步：PD Source/Sink 能力协商：双方通过 PDO 协商完成电力连接（如 5V/3A）。此步骤只是建立电力，尚未进入高速模式。

第二步：Discover Identity（Vendor / Product / Cable）：DFP 主动发起 Discover Identity 命令，UFP 和 Cable 依次返回设备的 Vendor ID、UFP VDO1/2（包含 USB4 Capability 字段）和 Cable VDO1/2（线缆速率、被动/主动、USB4 支持位）。此时 PD 控制器会解析线缆 Cable 是否支持 USB4，速率是否满足要求。这些信息随后通过 Type-1 寄存器回报 AMD 平台。

第三步：DFP 发送 Enter USB Message（进入 USB4 的关键）：如果设备 + 线缆均支持 USB4，则：TPS6X99X（DFP）发送 Enter USB，UFP 返回 Enter USB 的接受指令，双方完成 USB4 模式的 PD 层间握手。PD 控制器通过 Type-1 命令设置：DFP 的数据角色、USB4 模式和线缆的速率，完成和 AMD 的协商，与此同时，TPS6X99X（DFP）配置重新定时器（Re-timer）。

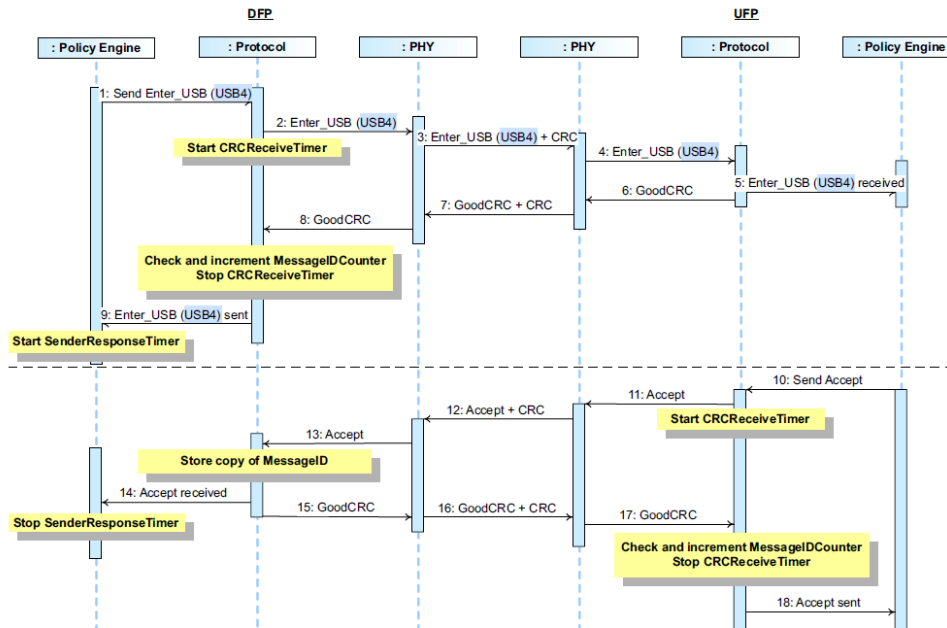


Figure 3. USB4 模式协商流程

3 USB Type-C PD 控制器配置 USB 模式（AMD 平台）

本章以调试为导向，结合 TPS6×99× 系列的寄存器配置与 AMD 平台和重新定时器（Re-timer），给出 USB3.x/USB4 模式无法正常识别时的系统级调试路径。内容包括：PD 控制器内部 USB 模式配置、与 AMD 平台的握手过程，以及 Re-timer 的事件配置方法，并通过三个典型案例说明缺陷定位方法。

3.1 Type-C PD 控制器开启 USB 模式

AMD 平台的 Type-C PD 控制器连接 USB4 设备显示设备没有正常连接，抓取的 CC 协议沟通的结果如 Figure 4 所示。Type-C PD 控制器和 USB4 设备进行了电源信息的沟通，USB Type-C PD 控制器和 USB4 设备建立 5V/3A 的功率能力，开启了交替模式（Alternate mode）的模式沟通，但进入了 DisplayPort 模式，没有进入到 USB4 模式。

Source Capabilities (1=Fixed 5V 3A)	OUT	4 bytes (2C 91 01 27)
Request (1=Fixed 5V 3A, Requested 3A, Max 3A) > Accepted	IN	4 bytes (2C B1 04 13)
PsRdy	OUT	0 bytes
Discover Identity > Ack (PDUSB Hub)	OUT	4 bytes (01 A0 00 FF)
SOP' Discover Identity > Ack (Type-C to Type-C 5A)	OUT	4 bytes (01 A0 00 FF)
SOP' Discover SVIDs > Ack (Cypress, Intel)	OUT	4 bytes (02 80 00 FF)
SOP' Intel Discover Modes > Ack (Thunderbolt Cable, No retimer, 20Gb/s)	OUT	4 bytes (03 80 87 80)
Discover SVIDs > Ack (DisplayPort)	OUT	4 bytes (02 A0 00 FF)
DisplayPort Discover Modes > Ack (UFP_D Capable, CD)	OUT	4 bytes (03 A0 01 FF)
DisplayPort Enter Mode (Mode=1) > Ack	OUT	4 bytes (04 A1 01 FF)
DisplayPort Status Update (DFP_D connected, Enabled) > Ack (UFP_D connecte...	OUT	8 bytes (10 A1 01 FF 09 00 00 00)
DisplayPort Configure (Set Config as DP Sink, D) > Ack	OUT	8 bytes (11 A1 01 FF 06 08 00 00)
Discover SVIDs > Ack (DisplayPort)	OUT	4 bytes (02 A0 00 FF)
DisplayPort Attention (UFP_D connected, Enabled, HPD High)	IN	8 bytes (06 A1 01 FF 9A 00 00 00)

Figure 4. DP Communication Process

抓取的 CC 沟通的解析结果显示笔记本的 Type-C PD 控制器没有直接进入 USB4 模式，需要检查 USB4 模式的配置。开启 USB3.x/USB4 的能力需要检查 0X28/0X29/0X47 寄存器，详细配置如图 Figure 5 所示，GUI 的工具为 LENOVO ONLY Application Customization 6.9.19。

TPS6X99X 控制器启用 USB4 前必须完成以下三个寄存器配置。这三个寄存器决定 PD 控制器是否会启用 SuperSpeed/USB4 能力、主动触发 Enter USB、报告自身 DFP/UFP 能力。0X28 寄存器用于声明 Type-C 协议下的高速能力，包括 USB3 Gen1 (5Gbps) 和 USB3 Gen2 (10Gbps)。在笔记本 DFP 端口的 USB4 能力时，通常要求 USB3 Gen2 能力。0x29 寄存器主要配置 USB Type-C PD 控制器的角色能力 (DFP/UFP)，在 AMD 平台的笔记本中，USB4 端口需要在连接 USB4 设备时主动成为 DFP，并且正确报告 Data Role，以启动 USB4 协商。若 DFP 能力未打开，笔记本无法发起 USB4 协商，通常会回退到 USB3 或 DP Alt Mode。0x47 寄存器主要配置 USB 模式使能，若该寄存器中字段的 USB2/3/4 未开启，则无论 Cable/设备如何支持，系统永远不会进入 USB4。

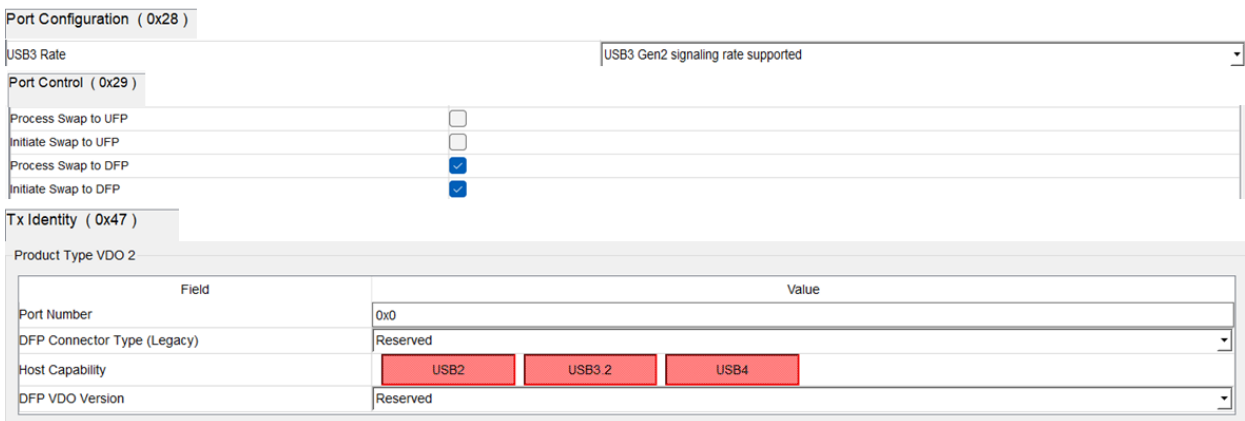


Figure 5. TPS6X99X 配置 USB 模式的条目

开启 DFP 的模式，使其在连接设备时能主动成为 DFP。支持 USB3.x/USB4，需要开启 USB2/3/4 的能力。在连接 USB4 的设备的情况下可以主动发起 USB 4 模式的协议沟通，成功开启上述功能后，笔记本的 USB Type-C PD 控制器的率先发起 USB4 模式，设备会配合并进入到 USB4 模式，如 Figure 6 所示。

如果 USB4 没有成功建立，调试建议读取 0x28 寄存器的 USB3 速率，0x29 寄存器的 数据角色和 0x47 寄存器的 USB2/3/4 的能力。

Source Capabilities (1=Fixed 5V 3A)	OUT	4 bytes (2C 91 01 27)
Request (1=Fixed 5V 3A, Requested 3A, Max 3A) > Accepted	IN	4 bytes (2C B1 04 13)
PsRdy	OUT	0 bytes
Discover Identity > Ack (PDUHub Hub)	OUT	4 bytes (01 A0 00 FF)
SOP! Discover Identity > Ack (Type-C to Type-C 5A)	OUT	4 bytes (01 A0 00 FF)
Enter USB (USB 4.0)	OUT	4 bytes (00 E0 67 24)
Accept	IN	0 bytes
SOP! Discover SVIDs > Ack (Cypress, Intel)	OUT	4 bytes (02 80 00 FF)
SOP! Intel Discover Modes > Ack (Thunderbolt Cable, No retimer, 20Gb/s)	OUT	4 bytes (03 80 87 80)
Discover SVIDs > Ack (DisplayPort)	OUT	4 bytes (02 A0 00 FF)
DisplayPort Discover Modes > Ack (UFP_D Capable, CD)	OUT	4 bytes (03 A0 01 FF)
Discover SVIDs > Ack (DisplayPort)	OUT	4 bytes (02 A0 00 FF)
Discover SVIDs > Ack (DisplayPort)	OUT	4 bytes (02 A0 00 FF)

Figure 6. USB4 Communication Process

3.2 Type-C PD 控制器配置 AMD 平台的能力

AMD 平台的 Type-C PD 控制器连接 USB4 设备显示 CC 协议沟通的结果如 Figure 6 所示，代表 Type-C PD 控制器和 USB4 设备属于正确沟通。但是显示还没有正确连接，此时就需要抓取 Type-C PD 控制器和 AMD 平台间的沟通，抓取 I2C 通信如 Figure 7 所示。通信显示 Type-C PD 控制器没有配置平台，没有建立通信，需要检查 Type-C PD 控制器的配置。

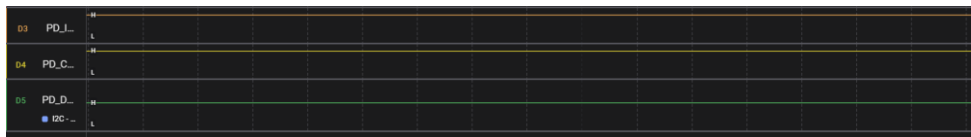


Figure 7. I2C3 通讯内容

TPS6X99X 的 0X27/0X28/0X55/0X64 寄存器。0X27/28 寄存器是按照 AMD 平台的安全状态（Crossbar）设定配置模式。可以配置轮询模式和中断模式，如果配置为中断模式，并且为扩展模式，可以配置为扩展写入模式（Extended mode）。0X64 寄存器主要配置 AMD 平台的安全状态（Crossbar）和重新定时器（Re-timer）的配置地址。字段（Bitfield）80 到 86 是配置安全状态（Crossbar MUX）的地址。字段（Bitfield）0 到 62 是配置重新定时器（Re-timer）的地址。当前配置 AMD 平台的交叉状态（Crossbar）的地址为 0X58，重新定时器（Re-timer）的配置地址为 0X08。0X55 寄存器的字段 6 是开启配置 AMD 平台的时序的地址。

Global System Configuration (0x27)

Crossbar Polling Mode | Interrupt Mode

Crossbar Config Type 1 Extended | Type 1 Extended Write

Port Configuration (0x28)

Crossbar I2C Controller enable | Crossbar mux is enabled on the I2C3 Controller

Crossbar Config Type 1 Extended | Type 1 Extended Write

Special Configuration (0x55)

Enable Pheonix Support

I2C Controller Config (0x64)

Bit Posn	Field	Value
[0:6]	Target Address 1	0x8
[8:14]	Target Address 2	0x0
[16:22]	Target Address 3	0x0
[24:30]	Target Address 4	0x0
[32:38]	Target Address 5	0x0
[40:46]	Target Address 6	0x0
[48:54]	Target Address 7	0x0
[56:62]	Target Address 8	0x0
[64:70]	Target Address TBT 1	0x0
[72:78]	Target Address TBT 2	0x0
[80:86]	Target Address Crossbar Mux	0x58
[87]	Port Index Value for Crossbar Mux Target	<input type="checkbox"/>
[88:94]	External DCDC Target Address	0x0

Figure 8. TPS6X99X 开启配置 AMD 平台 USB 模式的条目

3.3 Type-C PD 控制器配置重新定时器 (Re-timer) 的能力

AMD 平台的安全状态 (Crossbar) 和 Type-C PD 控制器之间通信正常，但是 AMD 平台和 USB4 设备之间还没有建立通信，测试 I2C 通信结果如 Figure 9 所示。测试显示 USB Type-C PD 控制器配置了平台的 USB3.X/USB4 模式，但是没有配置重新定时器 (Re-timer)。此时需要检查 TPS6X99X 配置重新定时器 (Re-timer) 的事件。


```

write to 0x58 ack data: 0x00 0x00 0x00 0x00 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x40 0x40
write to 0x58 ack data: 0x00 0x01 0x00 0x00 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x41 0x40
write to 0x58 ack data: 0x00 0x00 0xA4 0x10 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x40 0x40
write to 0x58 ack data: 0x00 0x04 0xA5 0x10 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x44 0x40
    
```

Figure 9. Type-C PD 控制器配置 AMD 平台的 USB4 的参数

TPS6X99X 配置重新定时器 (Re-timer)，需要首先设定好需要支持的 I2C 配置事件，以及配置的数量，配置数量如 Figure 10 所示。0X62 寄存器是配置 I2C 事件的数量，TPS6X99X 支持 80 个 I2C 配置事件，起始位 0，终止位 79。0X62 寄存器的字段 16 到 23 是配置 I2C 配置的起始位数，字段 24 到 31 配置 I2C 数量信息。其次，TPS6X994 是双口 Type-C PD 控制，字段 32 到 47 是配置端口 1 的 I2C 数量，字段 48 到 63 是配置端口 2 的 I2C 的数量。如果双端口配置器的数量和事件相同，可以通过配置字段 16 到 31 配置相同的是起始位和数量。

Bit Posn	Field	Value
[0:7]	Country Code Start Index	0
[8:15]	Number of Country Codes	0
[16:23]	I2C Event Start Index Common	1
[24:31]	Number of I2C Common Events	19
[32:39]	I2C Event Start Index Port 1	0
[40:47]	Number of I2C Port 1 Events	0
[48:55]	I2C Event Start Index Port 2	0
[56:63]	Number of I2C Port 2 Events	0

Figure 10. I2C 事件数量的配置条目

TPS6X99X 配置重新定时器 (Re-timer) 的详细事件如 Figure 11 所示，详细配置事件见 Retimer 的配置内容，包含 I2C 的详细触发事件、数据长度、和详细数据的值。字段 0 到 7 是配置 USB3/4 模式，需要配置安全模式、USB3 模式和 USB4 模式；字段 8 到 12 和 24 到 511 是配置数据的长度和具体配置的内容。

Bit Posn	Field	Value
[0:7]	Trigger Event	I2C_CNTRLR_EVENT_USB3_EVENT_UU
[8:12]	Data Length	4
[13:16]	Target Address Index	0
[17:18]	Priority	0
[19]	Orientation Independent	<input type="checkbox"/>
[24:511]	Data	0x2100

Figure 11. I2C 事件配置条目

开启详细的 USB 模式配置，配置 AMD 平台和重新定时器（Re-timer）的详细配置流程和配置事件，TPS6X99X 配置 USB4 模式的详细内容如 Figure 12 所示。

```

write to 0x08 ack data: 0x00 0x01 0x00 0x00
write to 0x58 ack data: 0x00 0x00 0x00 0x00 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x40 0x40
write to 0x08 ack data: 0x00 0x21 0x00 0x00
write to 0x58 ack data: 0x00 0x01 0x00 0x00 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x41 0x40
write to 0x08 ack data: 0x00 0x01 0x00 0x00
write to 0x58 ack data: 0x00 0x00 0xA4 0x10 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x40 0x40
write to 0x08 ack data: 0x00 0x01 0x00 0x80
write to 0x58 ack data: 0x00 0x04 0xA5 0x10 0x01
write to 0x58 ack data: 0xA2
read to 0x58 ack data: 0x82
write to 0x58 ack data: 0x80
read to 0x58 ack data: 0x50 0x44 0x40

```

Figure 12. Type-C PD 控制器配置 USB4 的详细内容

4 USB Type-C PD 配置 AMD 平台 USB 4 功能的总结

本文基于 TI TPS6X99X 控制器，系统分析了 USB Type-C PD 控制器在 AMD 平台上实现 USB4 连接的完整技术路径。通过三个递进式的调试案例，揭示了从协议协商、平台配置到信号完整性管理的多层次协作机制。协议层：确保 USB4 模式支持能力正确启用，控制器能够发起和响应 USB4 协商。平台层：建立稳定的 I2C 通信机制，按照安全状态要求完成平台配置。物理层：通过 Re-timer 配置保障高速信号完整性，完成端到端链路建立。这种分层分析方法有助于快速定位问题根源，提高调试效率。随着 USB4 技术的普及，深入理解 Type-C PD 控制器与平台间的协作机制将对系统设计与故障诊断产生重要价值。

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
- [3] AMD USB Power Delivery I2C Target Programming Guide for APU

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