

# USB Type-C™和 USB 功率传输电源路径设计注意事项



**Eric Beljaars**

应用工程师  
德州仪器

借助 **USB Type-C** 连接器，用户可以通过同一连接器为笔记本电脑充电并连接到显示器、音箱、存储设备或耳机。利用 **USB 功率传输 (PD)**，之前分离的许多功能现在都可以集成到同一连接器上。**USB PD** 协议允许为发送设备或接收设备提供 **5A** 的电流。

对于某些应用，5 A 的电流可能是不足够的，因此需要定制。德州仪器 (TI) 可在双电源模式下配置 **USB PD** 控制器。该模式下，两个 **USB Type-C** 电源路径可并联运行，在与标准 **USB PD** 电源相同电压条件下，(5 V、9 V、15 V 和 20V) 提供多达 10 A 的电流能力。这种自定义行为在电源设计和 **PD** 控制器的配置中都需要特别考虑。

### 硬件设计

在设计大电流系统时，需要考虑热性能和效率这两个具体的设计要素。我们来讨论一下电源转换器的设计，市场上大多数笔记本电脑的充电电压为 20V，标准笔记本电脑充电器中 **AC/DC** 转换器的直流输出电压为 19.5V 至 20V。对于在 **USB PD** 协议中定义的 20 V **USB PD**，19.5 V 电压是在允许的 5% 误差内的。如果降压控制器在外部场效应晶体管 (FET) 上支持 100% 占空比，则允许仅采用降压电源架构的设计。还可以与降压转换器并联，增加一个旁路路径，这将输入电压直接传递至降压转换器输出，无需通过电感。这种方法可具备出色的热性能，但需要添加两个额外的 FET。

### DC/DC 降压设计

对于这个具体的设计示例，我会使用 TI 的 **LM3489** 磁滞 p 沟道 FET (PFET) 控制器。该集成电路 (IC) 允许外部 PFET 上 100% 的占空比，可直接从 **AC/DC** 转换器通过外部 19.5 V。市场上大多数 **USB PD** 控制器都具有通用输入/输出 (GPIO)，用于控制外部稳压器输出电压。**PD** 控制器可以通过调节降压的反馈网络来调整 **LM3489** **DC/DC** 降压转换器的输出电压。

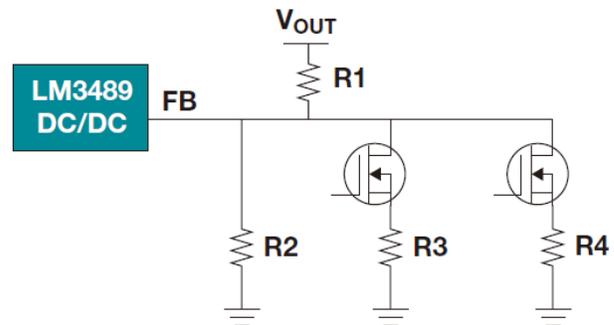


图 1. DC/DC 可调反馈网络。

图1所示的架构可用于输出所有四个标准USB PD电压（5V、9V、15V和20 V）。选择R1和R2时，默认输出电压为5V。USB PD控制器协议更高的电源电压时，它会切换GPIO信号，打开反馈网络中的n沟道FET（NFET），调节输出电压。启用Q1时，反馈网络会进行调整，使R2和R3与分压器顶部的R1并联。选择R3、R2时，R3与分压器顶部的R1并联会产生9 V输出。

启用Q2时，反馈网络会进行调整，使R2和R4与分压器顶部的R1并联。选择R4时，R2和R4与分压器顶部的R1的并联电阻产生15 V输出。最后，启用Q1和Q2时，R2、R3和R4均与分压器顶部的R1并联。选择电阻值，产生20 V输出。

设计输出大于 5 A 的系统时，旁路通路可以直接将 AC/DC 输出电压传递给系统中的 V<sub>BUS</sub> FET。使用通过 GPIO 控制的 PFET 旁路通路是一种实现此目的简单方法。

对于此应用，使用具有低R<sub>DS(on)</sub>且相对较大的PFET，通过外部旁路通路将损耗降至更低。

这种电源架构使LM3489能根据所连接的设备产生所有标准USB PD的电压。一旦交替模式（Alternate Mode）启动协商高功率模式，USB PD控制器就可以切换GPIO，使外部旁路通路能够直接将AC/DC输出电压传递给V<sub>BUS</sub>FET。这样USB PD电源系统便能够保持兼容，同时使高功率模式下的损耗更小。

图2重点说明了电源架构-包括由背对背PFET组成的旁路路径。当路径禁用时，V<sub>OUT</sub>侧PFET的体二极管会阻止AC/DC电源电压泄漏到LM3489的输出。协议并进入交替模式，会启用外部PFET路径。切换启动引脚，并使用这种相同的GPIO信号来同时禁用LM3489 DC/DC，可以在启用外部PFET路径时使DC/DC不会以20 V反向馈电。

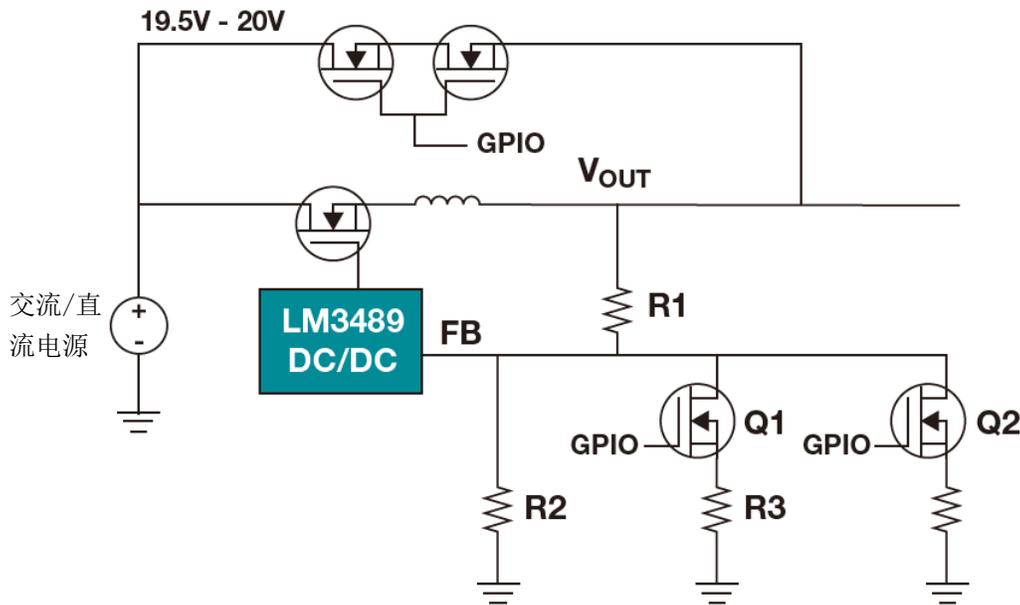


图2.带旁路FET的GPIO控制式降压DC/DC。

## USB PD控制器设计

USB PD 控制器对于实现前述讨论的功能至关重要。它必须能够控制 GPIO，并以更小的损耗通过其  $V_{BUS}$  FET 处理大电流。在此特定示例中，我使用的是 TPS65987D。为了控制上一节中所述的 LM3489 DC/DC，TPS65987D 使用真值表（表 1）中的两个 GPIO 来产生输出电压。

输出电压	GPIO0	GPIO1
5V	0	0
9V	1	0
15V	0	1
20V	1	1

表1.GPIO控制真值表。

或者，如果系统的输入电压低于 20 V，则可以使用自带 I<sup>2</sup>C 的降压/升压控制器（如 [bq25703A](#) 代替 LM3489。虽然您通常需要一个微控制器（MCU）来控制降压升压控制器，但是借助 TPS65987D 的集成 I<sup>2</sup>C 主机，MCU 就不再必需。

根据 USB PD 协议，在其配置通道（CC）线路上带有  $R_D$  的设备必须将 DC/DC 控制器的输出电容与  $V_{BUS}$  隔离。在这种情况下，系统必须具有  $V_{BUS}$  FET 以满足此协议。TPS65987D 有两个高压背对背集成 FET，可满足此要求。TPS65987D 中的内部 FET 在 25°C 环境温度下的  $R_{DS(on)}$  约为 25mΩ。对于高电流应用，此电阻可能太高。当 5 A 的电流通过其中一个内部 FET 时，FET 中将消耗大约 750 mW 的功率。通过双电源模式，TPS65987D 能够同时并联关闭其两个内部电源路径。这种模式有效地将电源路径的  $R_{DS(on)}$  减半，并且还使 FET 内部的功耗减半。图 3 重点说明了 PD 控制器如何与此电源架构连接。

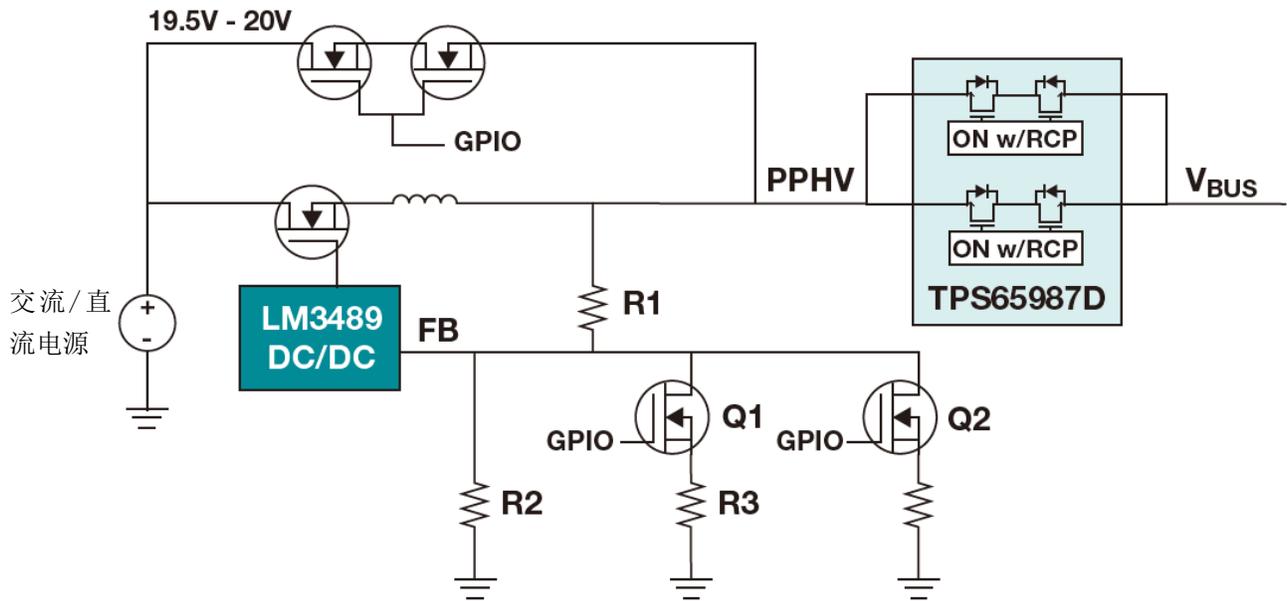


图3.带旁路 FET 的 GPIO 控制式 DC/DC 降压进入 USB PD 控制器。

同时打开两个FET，不仅允许两倍的电流通过USB PD控制器；还可以通过 $V_{BUS}$ FET大大降低损耗。许多应用有着非常严格的功率预算。高 $R_{DS(on)}V_{BUS}$  FET会阻碍USB Type-C在某些应用中的使用。TI通过提供更低的 $R_{DS(on)}$ 集成电源路径解决方案解决了这一问题，从而可以在以往从未考虑过的领域使用USB Type-C。

## $V_{BUS}$ 电源路径保护

当设计一个高功率系统时，保护用户和系统免受可能在电源路径上发生的任何有害事件至关重要。最难以防范的事件是 $V_{BUS}$ 对地短路。在这种情况下， $V_{BUS}$ 上的电流会迅速增加；在这些高电流电平造成损坏之前，电源路径必须立即断开FET。如果FET未快速断开，突增电流可能会损坏FET和系统的其余部分。

市场上的许多USB PD控制器都没有集成电源路径。通过这些类型的USB PD控制器，硬件设计人员可以使用分立元件提供保护。离散地实施过电流保护方案可能很繁琐；它通常涉及使用带有电流检测放大器的检测电阻。然后将电流检测放大器的输出馈入比较器，该比较器会触发USB PD控制器上的故障GPIO，或激活电路以禁用 $V_{BUS}$ FET的栅极。这不是最佳的解决方案，因为设置比较器后，就无法调整过流跳变点。如果 $V_{BUS}$ 对地短路，那么相比通过集成电源路径进行检测，分立式解决方案将需要更长的时间来检测短路并断开FET。

与过流保护一样，实施反向电流保护，可以保护系统免受不合规USB PD设备或适配器的影响。使用没有集成电源路径的USB PD控制器需要离散地实现反向电流保护，这是选择USB PD控制器时需要考虑的另一个设计因素。一个集成了电源路径和保护USB PD控制器可以节省设计时间，因为所有保护均已集成。这使您可以专注于设计的其他方面，而无需考虑外部电源路径和离散保护的设计。

图4重点说明了在具有适当保护的电源路径的 $V_{BUS}$ 对地短路期间会发生的情况。当 $V_{BUS}$ 上的电流迅速上升至约35 A时，USB PD控制器检测到此大电流并立即断开FET。 $V_{BUS}$ 对地短路保护必须通过硬件比较器作为固件来实现。固件实现无法足够快速地做出反应以保护电源路径和系统，这种电源路径快速关断可在发生硬短路时保护系统和FET。

如果系统没有得到适当的保护，可能会损坏DC/DC和 $V_{BUS}$ FET，系统甚至可能会变烧毁。电源发送端始终根据USB PD协议负责过流和短路保护。TPS65987D可以防止这些事件的发生。有关通过TPS65987D实现的各种保护的更多信息，请参阅应用报告

“[TPS65987DDH 电源路径性能和保护](#)。”

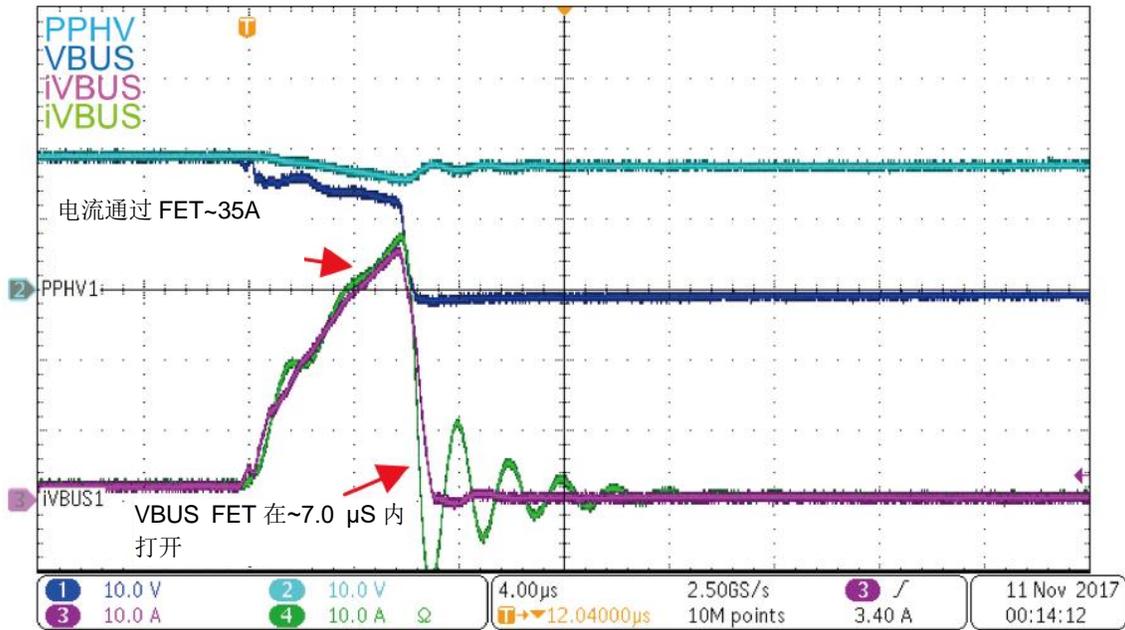


图 4.  $V_{BUS}$  对地短路,  $V_{BUS} = 20V$ 。

### 功率接收器设计

实现一个可在 USB Type-C 连接器上接收电源的设备要比发送设备更简单。接收设备不需要实施任何过流保护，因为它依赖于电源发送端进行保护。市场上的许多 USB PD 控制器支持“电池耗尽”操作。由于系统中唯一的电源是  $V_{BUS}$ ，因此电池耗尽模式可以使您设计一个完全由  $V_{BUS}$  供电且不需要任何外部电源的系统。当您的设备电池完全放电时，电池耗尽操作使整个系统能成功启动，并开始为电池充电或为系统供电，而不依赖于外部电源。

图5重点说明了采用TPS65987D进行接收设备设计的简单性。USB PD控制器会处理与发送端的协议，并相应地启用内部电源路径。当在发送端和接收端都使用TI USB PD控制器时，将两个设备都置于双电源模式下可进行大电流充电。双电源模式会同时关闭两个电源路径，因此 $R_{DS(on)}$ 会减半，且通过适当设计的电缆，高达10 A的电流可以从发送端流到接收端。

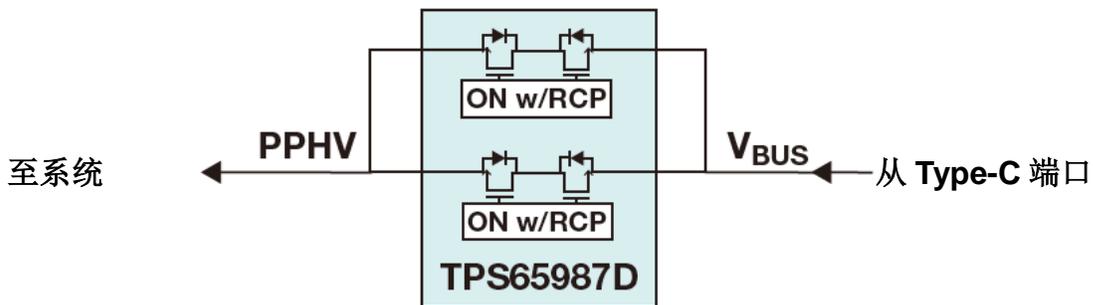


图 5. USB PD 控制器中的并联 FET 到  $V_{BUS}$ 。

## 双电源模式

使用TI的配置工具可配置双电源模式。为支持大电流，您必须确保接收设备和发送设备都配置为双电源模式，且设备之间的电缆额定可承受所需的电流。这通常需要使用带有电子标记的系留索或电缆。无电子标记的电缆不足以提供超过3 A的电流，不应将其用于大电流模式。USB PD协议规定电缆和连接器必须支持200%的工作电流条件，以便5 A电缆和连接器可以支持10 A一段时间。

当发送端设备进入双电源模式时，它将同时并行关闭两个电源路径并生成GPIO事件，将电源配置为提供合适的电流。相反，当接收端设备进入双电源模式时，它还会生成一个GPIO事件，向接收系统发送信号，表明它可能开始消耗大电流。重要的是，在两个设备都配置为双电源模式后，接收设备才开始消耗大电流。

## 结论

USB Type-C和USB PD使末端设备能够在同一连接器上实现更多功能。USB Type-C将高速数据和高达5 A的电流整合在一条电缆中，可为许多不同类型的末端设备提供全面的连接解决方案。但对于所有想要转移到USB Type-C的设计，5 A的电流不够充分，对于这些特定的应用，双电源模式可使系统设计人员实现较低的 $R_{DS(on)}$ 。

TI的TPS65987D使用双电源模式，提供更低 $R_{DS(on)}$ 的解决方案，以实现大电流充电。具有集成电源路径的USB PD控制器可通过简化系统电源设计，来缩短设计周期时间。通过集成电源路径保护，您可以将设计重点放在系统的其他方面，而不必担心电源路径受损。

**重要须知：** 本文所述的德州仪器股份有限公司及其附属公司的产品与设备均根据德州仪器标准销售条款和条件进行销售。建议客户在下单前先获取德州仪器产品及服务的最新最全信息。德州仪器对应用支持、客户应用、产品设计、软件性能以及专利侵权不承担任何责任。发布公司其他产品或服务相关的信息不构成德州仪器的批准、授权或背书。

Platform bar 是德州仪器的商标。其它所有商标归相关所有者所有。

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司