

Application Note

TPSM365R6 的反相应用



Joshua Austria

摘要

TPSM365R6 是一款 $3.5 \times 4.5\text{mm}^2$ 0.6A 额定同步降压电源模块，具有 3.6V 至 65V 的宽工作输入电压范围以及 1V 至 13V 的可调输出电压范围。TPSM365R6 可配置为反相降压/升压 (IBB) 拓扑，其输出电压相对于输入电压反相。本应用报告介绍了如何为反相应用配置 TPSM365R6 EVM 板。本应用手册还包含用于 EN 和 PGOOD 引脚的其他电平转换器电路。

内容

1 反相降压/升压拓扑.....	3
1.1 概念.....	3
1.2 输出电流计算.....	3
1.3 反相配置中的 V_{IN} 和 V_{OUT} 范围.....	4
2 设计注意事项.....	5
2.1 附加旁路电容器和肖特基二极管.....	5
2.2 启动行为和开关节点注意事项.....	6
3 外部组件.....	7
3.1 电容器选型.....	7
3.2 系统环路稳定性.....	7
4 典型性能.....	8
5 数字引脚配置.....	10
5.1 数字输入引脚.....	10
5.2 电源正常引脚.....	11
6 结论.....	14
7 参考文献.....	15

插图清单

图 1-1. 从降压转换为反相降压/升压拓扑.....	3
图 1-2. TPSM365R6 的建议最大输出电流.....	4
图 2-1. 具有肖特基二极管和大容量电容器及旁路电容器的 TPSM365R6 IBB.....	5
图 2-2. 使用肖特基二极管的 TPSM365R6 IBB 启动.....	5
图 2-3. 启动期间的 SW 节点电压.....	6
图 4-1. 使用的基本原理图.....	8
图 4-2. 使用的电容器.....	8
图 4-3. 效率与负载电流间的关系 ($V_{IN} = 24\text{V}$).....	8
图 4-4. 负载调节 ($V_{IN} = 24\text{V}$).....	8
图 4-5. 以 $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -12\text{V}$ 启动，无需电平转换器即可实现预期性能.....	8
图 4-6. 以 $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -12\text{V}$ 关断，无需电平转换器即可实现预期性能.....	8
图 4-7. $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -12\text{V}$ 时负载瞬态响应，100mA 至 410mA.....	9
图 4-8. $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -12\text{V}$ 时负载瞬态响应，0mA 至 410mA.....	9
图 4-9. $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -12\text{V}$ 、 $I_{OUT} = 0\text{mA}$ 时的输出电压波纹.....	9
图 4-10. $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -12\text{V}$ 、 $I_{OUT} = 410\text{mA}$ 时的输出电压波纹.....	9
图 4-11. $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -5\text{V}$ 、 $I_{OUT} = 450\text{mA}$ 时的温度响应.....	9
图 4-12. $V_{IN} = 24\text{V}$ 、 $V_{OUT} = -12\text{V}$ 、 $I_{OUT} = 410\text{mA}$ 时的温度响应.....	9
图 5-1. EN 引脚电平转换器.....	10
图 5-2. 启动时的 EN 引脚电平转换器.....	11

图 5-3. 关断时的 EN 引脚电平转换器.....	11
图 5-4. PGOOD 引脚电平转换器.....	12
图 5-5. 启动时的 PG 引脚电平转换器.....	13
图 5-6. 关断时的 PG 引脚电平转换器.....	13

表格清单

表 1-1. IBB 配置中 TPSM365R6 的建议最大输出电流计算.....	3
表 3-1. IBB TPSM365R6 的相位裕度.....	7
表 5-1. 具有 EN 电平转换器的逻辑状态.....	10
表 5-2. PGOOD 电平转换器行为期间的晶体管状态.....	12

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 反相降压/升压拓扑

1.1 概念

在标准降压配置中，正连接 VOUT 连接到内部电感器，返回连接到器件接地。

在 IBB 配置中，SYS_GND 连接到 TPSM365R6 的 VOUT 引脚，器件返回值现在为负输出电压 -VOUT。这种拓扑结构变化允许输出电压相对于输入电压进行反相。在标准降压配置中，连接到 TPSM365R6 IC GND 的引脚在反相降压/升压配置中仍可以同一引脚为基准。但是，要使用 EN 和 PGOOD 引脚，必须添加适当的电平转换器，节 5.1 和节 5.2 对此进行了详细说明。

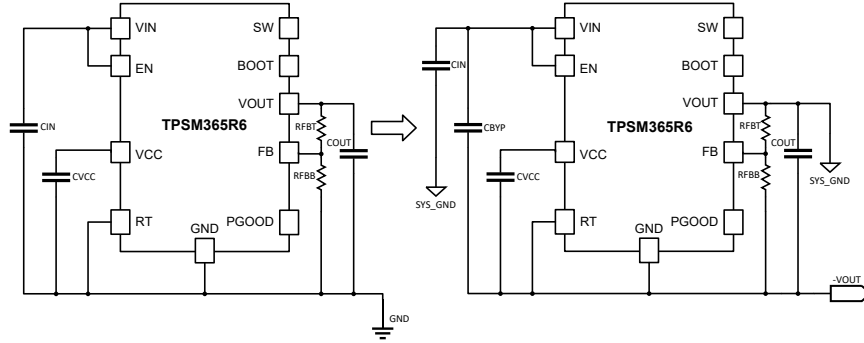


图 1-1. 从降压转换为反相降压/升压拓扑

1.2 输出电流计算

通过将降压配置更改为 IBB 配置，平均电感器电流会受到影响。IBB 拓扑中的输出电流能力小于降压配置。因此，可使用方程式 1 计算可实现的最大输出电流。

$$I_{OUT(IBB)} = I_{L_max} \times (1 - D) \quad (1)$$

- I_{L_max} 为最大额定电感器电流。
- TPSM365R6 具有一个 I_{L_max} 为 0.65A 的电感器。
- D 为工作占空比

使用方程式 2 可计算反相降压/升压转换器的工作占空比。

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{OUT} - V_{IN} \times \eta} \quad (2)$$

- In 方程式 2 V_{OUT} 用负值表示。

方程式 2 中的效率项会调整本节中的功率转换损耗公式，并产生更准确的最大输出电流结果。通过对 TPSM365R6 降压转换器在其标准配置下的效率求平均值，可以得出该效率。使用方程式 1 和方程式 2 计算建议的最大输出电流。例如，当输入电压为 24V、输出电压为 -12V、估计效率为 0.9 时，将按方程式 2 计算占空比，如下所示：

$$D = \frac{-12}{-12 - 24 \times 0.9} = 0.357 \quad (3)$$

然后，使用方程式 4 的结果通过方程式 1 来计算可实现的最大输出电流：

$$I_{OUT(IBB)} = 0.65 \times (1 - 0.357) = 0.42 \text{ A} \quad (4)$$

表 1-1 提供了 TPSM365R6 允许的最大输出电流的一般概念。

表 1-1. IBB 配置中 TPSM365R6 的建议最大输出电流计算

V _{OUT} (V)	V _{IN} (V)	I _{L_max} (A)	η	D	I _{OUT} (A)
-1.8	24	0.65	0.6	0.111	0.58

表 1-1. IBB 配置中 TPSM365R6 的建议最大输出电流计算 (continued)

V_{OUT} (V)	V_{IN} (V)	I_{L_max} (A)	η	D	I_{OUT} (A)
-2.5	24	0.65	0.7	0.130	0.57
-3.3	24	0.65	0.7	0.164	0.54
-5	24	0.65	0.8	0.210	0.52
-12	24	0.65	0.9	0.357	0.42

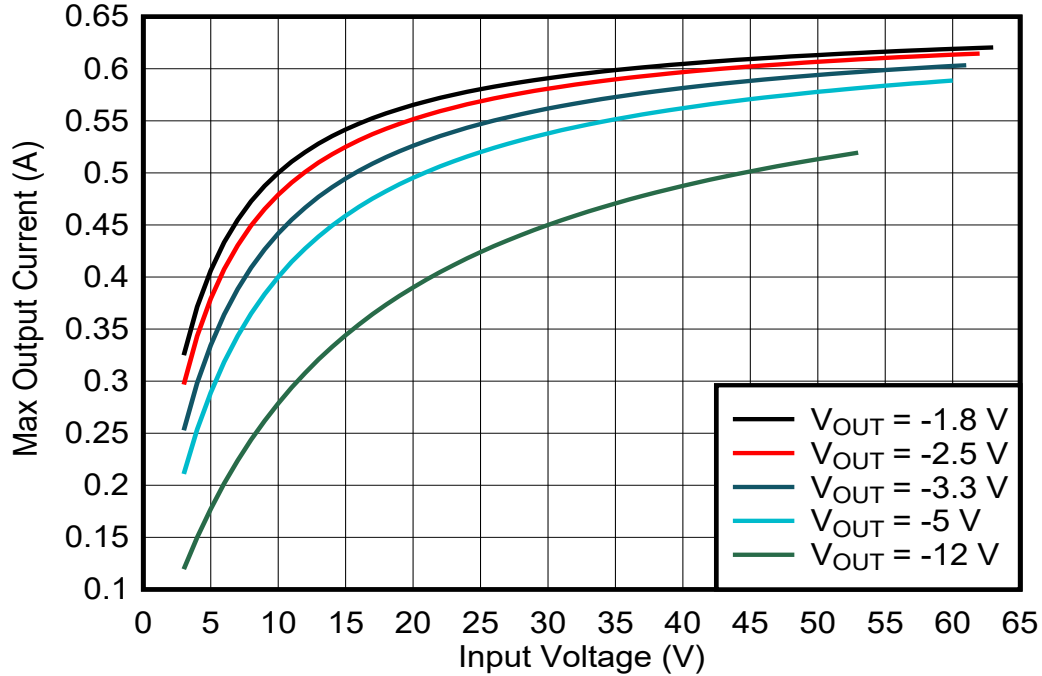


图 1-2. TPSM365R6 的建议最大输出电流

1.3 反相配置中的 V_{IN} 和 V_{OUT} 范围

在标准配置中，TPSM365R6 IC 可承受其 V_{IN} 和 IC GND 引脚之间的 65V 差值。但在 IBB 中，TPSM365R6 IC GND 以负输出电压引脚 $-V_{OUT}$ 为基准，请参阅图 1-1。TPSM365R6 的 V_{IN} 和 TPSM365R6 IC GND 引脚之间将产生从 V_{IN} 至 $-V_{OUT}$ 的电势差，可有效限制 TPSM365R6 模块在反相降压/升压配置中的输入电压范围。例如，对于 $-12V$ 的输出电压，最大输入电压将为 53V，这会导致 TPSM365R6 IC 的 V_{IN} 和 GND 引脚之间产生 65V 的电位差。TPSM365R6 IBB 拓扑中的输出电压范围为 $-1.8V$ 至 $-13V$ 。

2 设计注意事项

2.1 附加旁路电容器和肖特基二极管

您可以使用最小电容值为 $10\mu\text{F}$ 的陶瓷旁路电容器 **CBYP** 来降低输入电源噪声。必须考虑 **CBYP** 的额定电压，因为该电容器将承受等于 V_{IN} 和 $-V_{\text{OUT}}$ 之间的完整电压范围的应力。一般情况下，使用至少是整个预期电压范围额定电压两倍的电容器。

但是，包含 **CBYP** 电容器会引入从 V_{IN} 到 $-V_{\text{OUT}}$ 的交流路径，并可能导致瞬态响应恶化。当 V_{IN} 施加到电路时，旁路电容器上的 dV/dt 会产生一个必须返回接地以完成环路的电流。该电流可能流过 MOSFET 的内部低侧体二极管和电感器，再返回地。TI 建议在 $-V_{\text{OUT}}$ 和 **SYS_GND** 之间放置一个肖特基二极管，避免损坏上述内部低侧 MOSFET。此外，该肖特基二极管将降低由快速 V_{IN} 启动导致的 $-V_{\text{OUT}}$ 下的潜在正输出电压尖峰，如图 2-2 所示。如果预计会出现较大的线路瞬变，请增大输出电容以使输出电压保持在可接受的电平范围内。

请注意，为了使系统保持稳定，必须有一个输入电源电容器来帮助抑制可能耦合到电路中的高频噪声。添加具有中等 ESR 的电解电容器 **CBULK** 有助于抑制长电源引线引起的任何输入电源振铃。应在 V_{IN} 和 **SYS_GND** 两端添加该 **CBULK** 电容器。

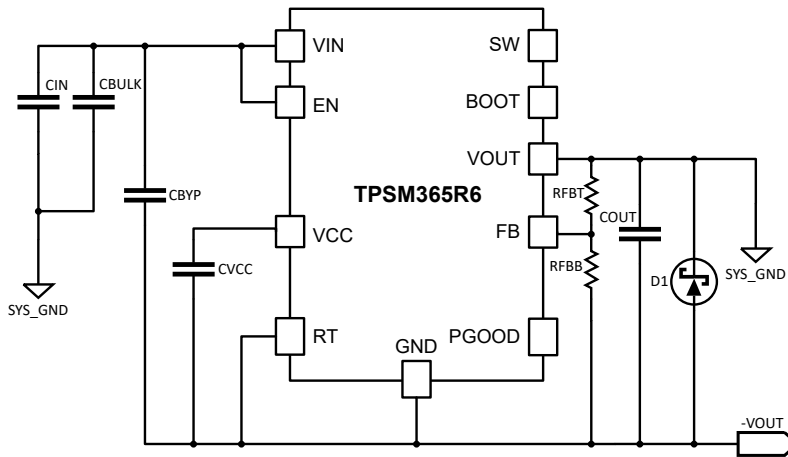


图 2-1. 具有肖特基二极管和大容量电容器及旁路电容器的 TPSM365R6 IBB

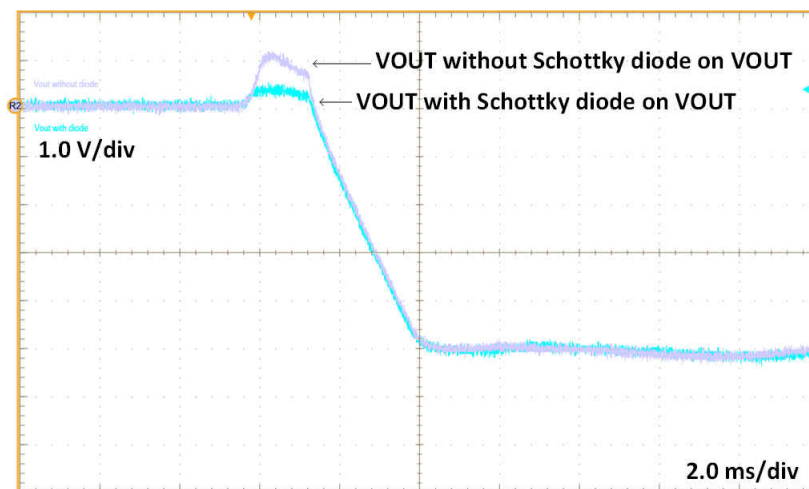


图 2-2. 使用肖特基二极管的 TPSM365R6 IBB 启动

2.2 启动行为和开关节点注意事项

在降压应用中，SW 引脚上的电压在 IBB 拓扑中从 VIN 切换到 -VOUT，而不是从 VIN 切换到 TPSM365R6 IC GND。当高侧 MOSFET 导通时，SW 节点会看到输入电压。当低侧 MOSFET 导通时，SW 节点会检测到器件的 SYS_GND，它连接到负输出电压引脚 -VOUT。在启动期间，VIN 会上升以达到所需的输入电压。在 EN 引脚电压超过其阈值电平且 VIN 超过其 UVLO 阈值后，VOUT 开始斜降。随着 -VOUT 继续下降，SW 节点的低电平随 -VOUT 变化。图 2-3 展示了输出电压产生的正常平滑启动。

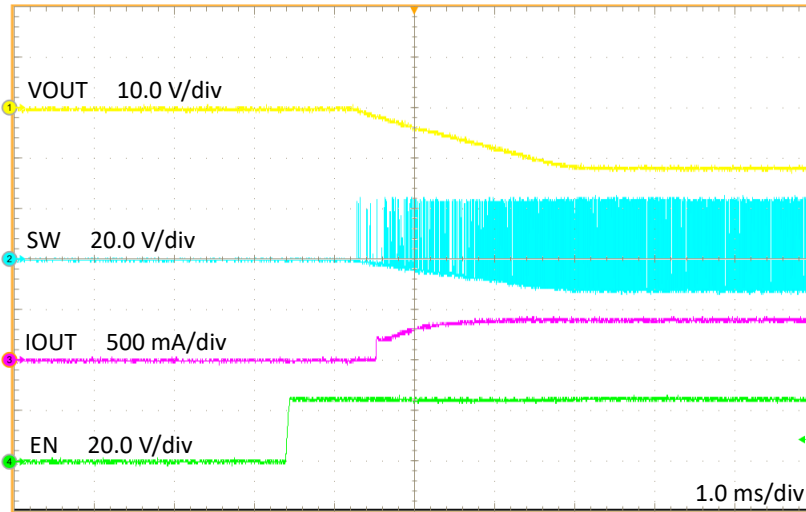


图 2-3. 启动期间的 SW 节点电压

3 外部组件

TPSM365R6 包含集成功率 MOSFET 和屏蔽式电感器。因此，反相降压/升压应用只需要四个外部元件。所需的外部元件包括其输入和输出电容以及大小合适的旁路电容器。使用 TPSM365R6 EVM 时，已包含大多数所需元件；但是，需要在 VIN 和 VOUT 引脚之间放置一组新的输入电容器。TI 还建议增大 VIN 和 TPSM365R6 IC GND 引脚之间旁路电容器的电容，以便提高反相降压/升压的负载瞬态性能。有关这些元件的更多信息，请参阅节 2.1 和节 3.2 以及 [TPSM365R6](#) 的数据表。建议执行负载瞬态测试和频率扫描以评估稳定性。

3.1 电容器选型

为了实现低输出电压纹波，建议使用等效串联电阻 (ESR) 较低的陶瓷电容器。建议使用电介质类型为 X5R 或 X7R 的电容器，从而保证在温度范围内具有稳定的电容特性和直流偏置。施加到电容器上的直流电压越高，有效电容就越小。正常运行要求输入电容器 CIN 的最小电容为 2.2 μF，并联高频输入电容器的最小电容为 0.1 μF。

标准降压评估模块的 CIN 在反相降压/升压配置中充当旁路电容器，如图 1-1 所示。所含的这个电容器将具有来自评估板的固有 2.2 μF 电容，但可以添加更多旁路电容以提高负载瞬态性能。

在正常运行下评估电路的波特图还可以深入了解系统的稳定性。具有稳定的相位裕度为在不同输出电压下反相降压/升压的最小建议输出电容奠定了基础。有关建议的最小输出电容，请参考表 3-1。

3.2 系统环路稳定性

当增加更多的输出电容时，稳定性是系统中的一个重要因素。稳定设计的一般经验法则是所需的相位裕度 (PM) 至少为 45° 且低于 70°。在某些情况下，为了保持系统开环条件的稳定性，需要使用前馈电容器 C_{ff}。TPSM365R6 EVM 本身包含一个 10 μF 前馈电容器。作为一般经验法则，[方程式 5](#) 可用于确定 C_{ff} 的有效值。C_{ff} 将放置在 RFBT 电阻器上，如图 1-1 所示。

$$C_{ff} = \frac{1}{2\pi \times R_{FBT} \times 2f_{c_noC_{ff}}} \quad (5)$$

- f_{c_{noC_{ff}} 是不带 C_{ff} 的器件的交叉频率}

[表 3-1](#) 展示了相对于 VIN、-VOUT 和 IOUT 的理论化 PM 和电容。借助 TPSM365R6 EVM 中包含的 10 μF 前馈电容器，这些电容器值和相关的额定电压可提供所需的相位裕度。

表 3-1. IBB TPSM365R6 的相位裕度

VIN	-VOUT	COUT	电压额定值 (V)	PM (°)
24	-2.5	10	25	56.59
24	-3.3	10	25	63.47
24	-5	22	25	66.45
24	-12	44	25	60.40

4 典型性能

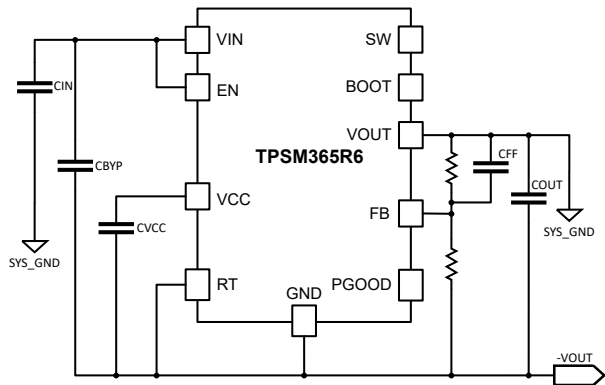


图 4-1. 使用的基本原理图

DSG NR	器件型号	说明	制造商	数量
CIN	C3225X7R2A225K230AM	2.2uF、100V、X7R、1210	TDK	1
	GRM188R72A104KA35J	0.1uF、100V、X7R、0603	MuRata	1
CFF	CGA2B2C0G1H100D050BA	10pF、50V、C0G/NP0、0402	TDK	1
CBYP	C3225X7R2A225K230AB	2.2uF、100V、X7R、1210	TDK	1
CVCC	C1608X7R1C105K080AC	1uF、16V、X7R、0603	TDK	1
COUT	C3225X7R1E226M250AB	22uF、25V、X7R、1210	TDK	2

图 4-2. 使用的电容器

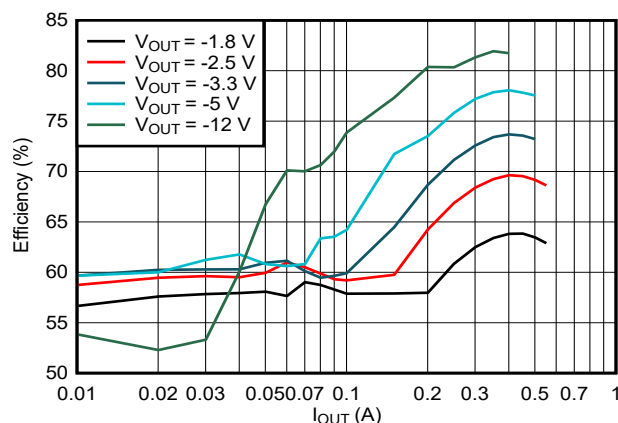


图 4-3. 效率与负载电流间的关系 (VIN = 24V)

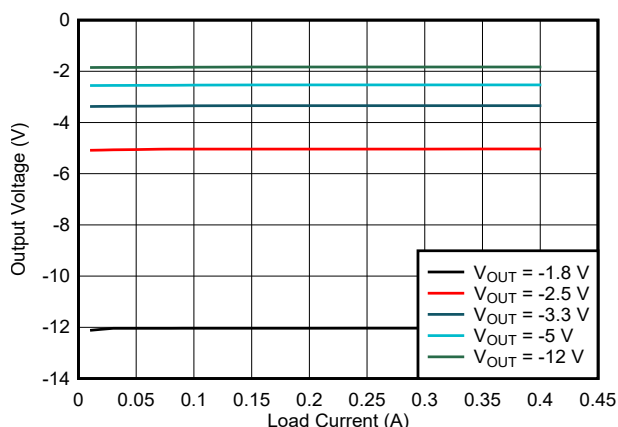


图 4-4. 负载调节 (VIN = 24 V)

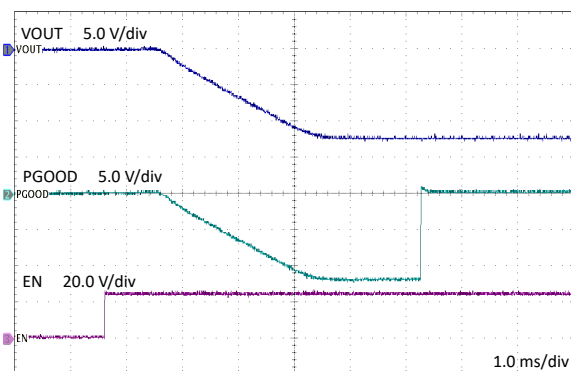


图 4-5. 以 VIN = 24V、VOUT = -12V 启动，无需电平转换器即可实现预期性能

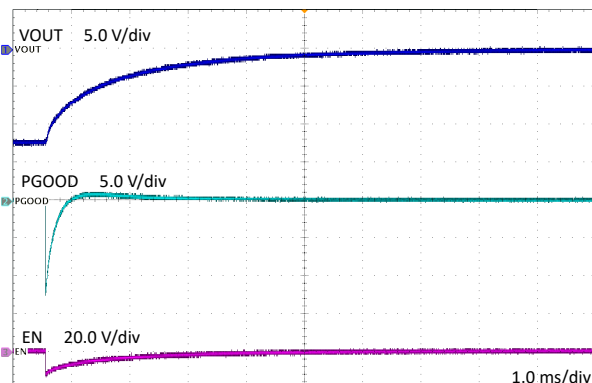


图 4-6. 以 VIN = 24V、VOUT = -12V 关断，无需电平转换器即可实现预期性能

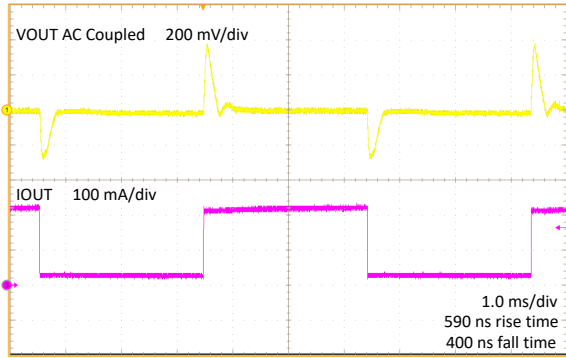


图 4-7. $V_{IN} = 24V$ 、 $V_{OUT} = -12V$ 时负载瞬态响应， $100mA$ 至 $410mA$

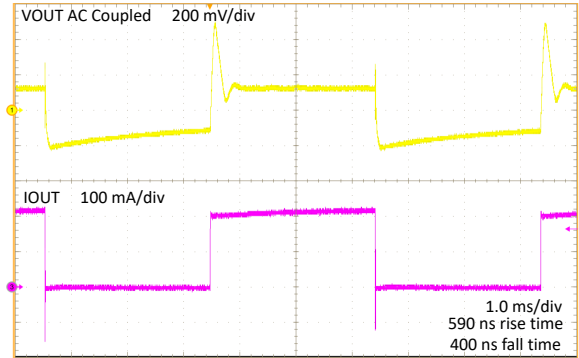


图 4-8. $V_{IN} = 24V$ 、 $V_{OUT} = -12V$ 时负载瞬态响应， $0mA$ 至 $410mA$

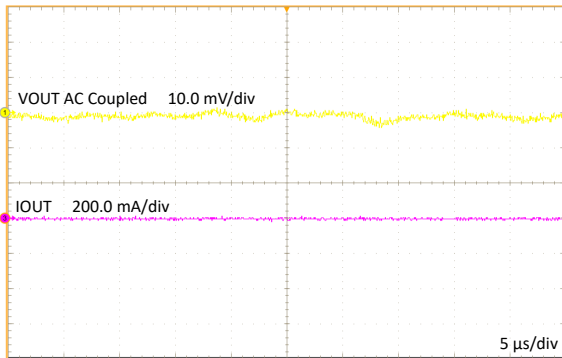


图 4-9. $V_{IN} = 24V$ 、 $V_{OUT} = -12V$ 、 $I_{OUT} = 0mA$ 时的输出电压波纹



图 4-10. $V_{IN} = 24V$ 、 $V_{OUT} = -12V$ 、 $I_{OUT} = 410mA$ 时的输出电压波纹

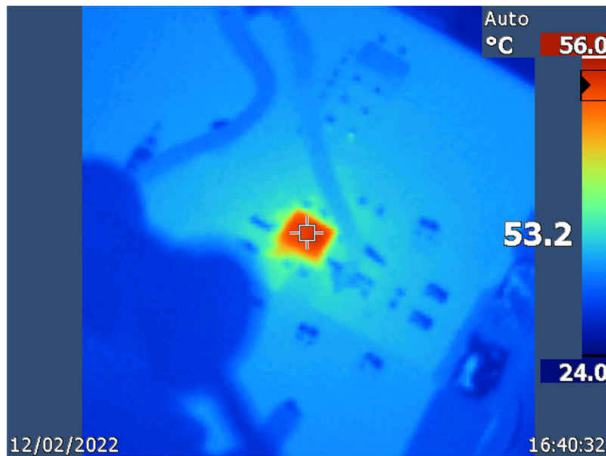


图 4-11. $V_{IN} = 24V$ 、 $V_{OUT} = -5V$ 、 $I_{OUT} = 450mA$ 时的温度响应

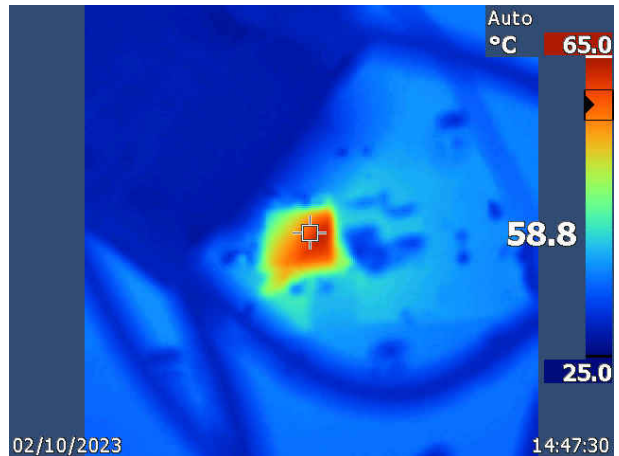


图 4-12. $V_{IN} = 24V$ 、 $V_{OUT} = -12V$ 、 $I_{OUT} = 410mA$ 时的温度响应

5 数字引脚配置

5.1 数字输入引脚

TPSM365R6 有一个数字输入引脚 (EN)，可用于打开和关闭器件的输出。在 TPSM365R6 降压配置中，EN 引脚相对于 TPSM365R6 IC GND 的额定典型阈值电压被视为高于 1.36V 和低于 0.4V 的高电平。但是，在反相降压/升压配置中，EN 现在以 $-V_{OUT}$ 电压为基准，而不是 TPSM365R6 IC GND；因此，EN 引脚被视为高电平的阈值为 $1.36V + -V_{OUT}$ ，而 EN 引脚被视为低电平的阈值为 $0.4V + -V_{OUT}$ 。例如，如果 $-V_{OUT} = -12V$ ，EN 在高于 $-10.64V$ 的电压下将被视为高电平，在低于 $-11.6V$ 的电压下将被视为低电平。因此，在启动时，负输出电压将导致 EN 导通，但需要至少 $0.4V + -V_{OUT}$ 的电压才能关断器件。这种行为可能会导致难以禁用器件，因为在许多应用中，为 EN 信号供电的电压轨将无法产生将 EN 变为低电平所需的负电压。

相对简单的电平转换器可通过消除负 EN 信号，减少与 EN 阈值电压相关的任何问题。图 5-1 展示了创建 EN 引脚电平转换器所需的连接。

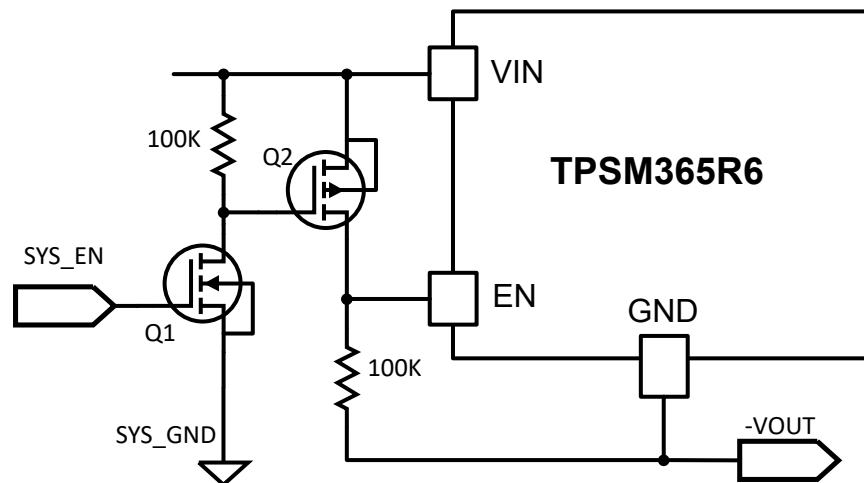


图 5-1. EN 引脚电平转换器

表 5-1. 具有 EN 电平转换器的逻辑状态

SYS_EN	低电平	高电平
Q1	关闭	打开
Q2	关闭	打开
EN 引脚	低电平	高电平

最初驱动 EN 的正信号 (SYS_EN) 改为连接到此电平转换器中 Q1 的栅极。当 SYS_EN 设置为 SYS_GND 时，Q1 关断。随后，Q2 检测到其栅极和源极之间没有电势差，也保持关断状态。在这种状态下，EN 引脚检测到 $-V_{OUT}$ 低于低电平阈值，并禁用该器件。

当 SYS_EN 在 Q1 的栅极和源极之间提供足够的正电压来导通 Q1 时，Q2 的栅极通过 Q1 被拉至 SYS_GND。这将驱动 Q2 的栅极和源极之间的负电势差，从而使其导通。因此，EN 通过 Q2 连接到 VIN，且该引脚高于高电平阈值，从而使器件导通。

对于预期的应用条件，选择具有适当电压额定值的 Q2 MOSFET 非常重要。可以使用额外的齐纳二极管和/或电阻分压器来降低 Q2 栅极的电势。确保在 IC 的导通和关断状态下均遵守 MOSFET 数据表中的 Q2 限制。

SYS_EN 信号激活 EN 引脚电平转换器电路并将 EN 引脚电压摆动至 VIN 和 $-V_{OUT}$ ，从而正确启用和禁用器件。[启动时的 EN 引脚电平转换器](#) 和 [关断时的 EN 引脚电平转换器](#) 展示了安装了 EN 引脚电平转换器的器件的行为。

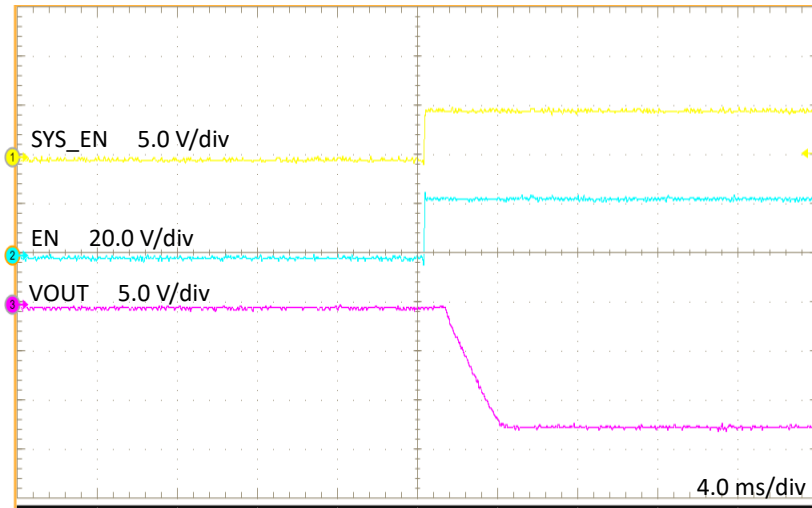


图 5-2. 启动时的 EN 引脚电平转换器

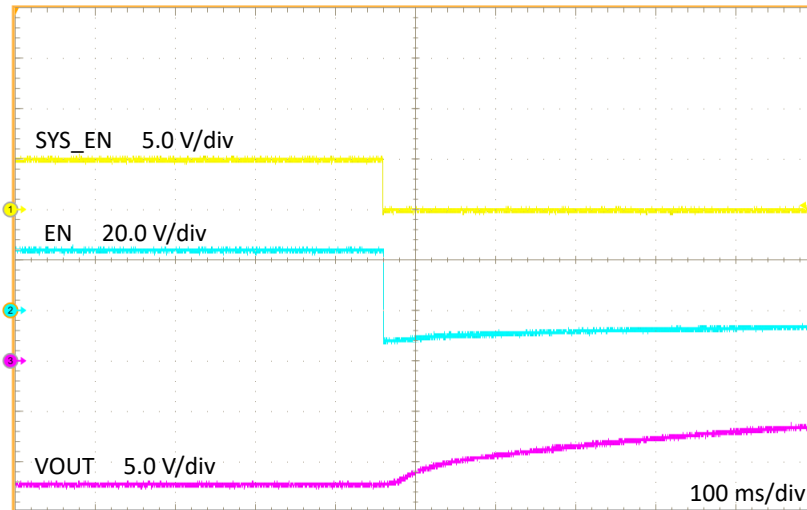


图 5-3. 关断时的 EN 引脚电平转换器

5.2 电源正常引脚

TPSM365R6 具有内置电源正常 (PGOOD) 功能，可指示输出电压是否已达到目标电压。PGOOD 引脚是开漏输出，需要使用一个上拉电阻器。在标准降压配置中，PGOOD 引脚将以 TPSM365R6 IC GND 引脚为基准，并在器件达到适当的输出电压时输出高电平信号。但是，在反相降压/升压配置中，当 TPSM365R6 的 IC GND 引脚变为 -VOUT 引脚时，PGOOD 引脚也将以 -VOUT 为基准。然后，当 PGOOD 为低电平时，该器件将其拉至 -VOUT。

这种行为可能会导致难以读取 PG 引脚的状态，因为在某些应用中，检测 PGOOD 引脚极性的 IC 可能无法承受负电压。电平转换器电路通过消除 PGOOD 引脚的负输出信号，减少了与 PGOOD 引脚电压相关的任何麻烦。如果不需要 PGOOD 引脚功能，则可以将其悬空或连接到 -VOUT。请注意，为避免违反绝对最大额定值，PGOOD 引脚的驱动电压不得超过负输出电压 20V 以上。图 5-4 展示了生成 PGOOD 引脚电平转换器所需的连接。

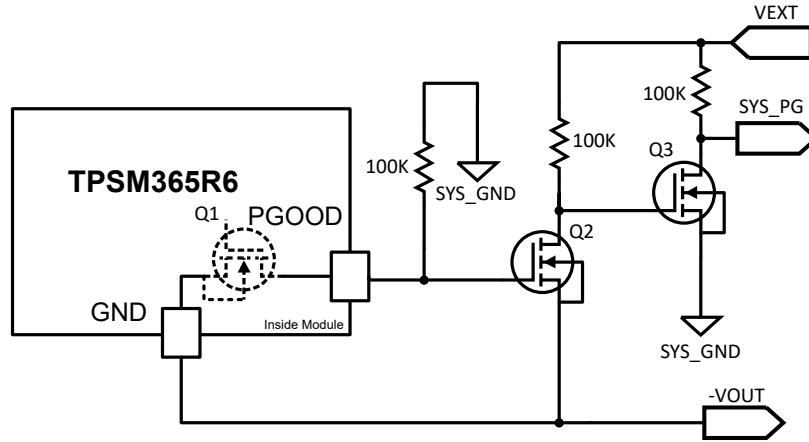


图 5-4. PGOOD 引脚电平转换器

表 5-2. PGOOD 电平转换器行为期间的晶体管状态

POWER	不好	合理
Q1	打开	关闭
Q2	关闭	打开
Q3	打开	关闭
SYS_PG	低电平	高电平

在内部，PGOOD 引脚连接到 N 沟道 MOSFET (Q1)。通过将 PGOOD 引脚绑定到 Q2 的栅极，当 PGOOD 引脚被拉至 -VOUT 时，Q2 将关断，因为在 Q2 的栅极和源极上不会检测到电势差。因此，Q3 将打开，因为它的栅极和源极之间的电势差将是 VEXT。请注意，VEXT 电压必须在 Q3 的栅极和源极之间提供足够的电势差以导通 Q3。然后，传出的 SYS_PG 信号被拉至 SYS_GND。

当 -VOUT 达到其目标值时，Q1 导通，这会将 Q2 的栅极拉至 SYS_GND。因此，Q2 会导通，因为其栅极电压高于其源极电压。这会将 Q3 的栅极拉至 -VOUT，从而关闭 Q3，因为其栅极现在的电势低于与 SYS_GND 相连的源极。Q3 关闭时，传出的 SYS_PG 信号被拉至 VEXT。

输出电压会激活 PGOOD 引脚电平转换器电路并将输出信号 SYS_PG 从 VEXT 摆动到 SYS_GND，从而正确显示器件的输出是否处于其目标输出电压。图 5-5 和图 5-6 展示了安装了 PGOOD 引脚电平转换器的器件的行为。

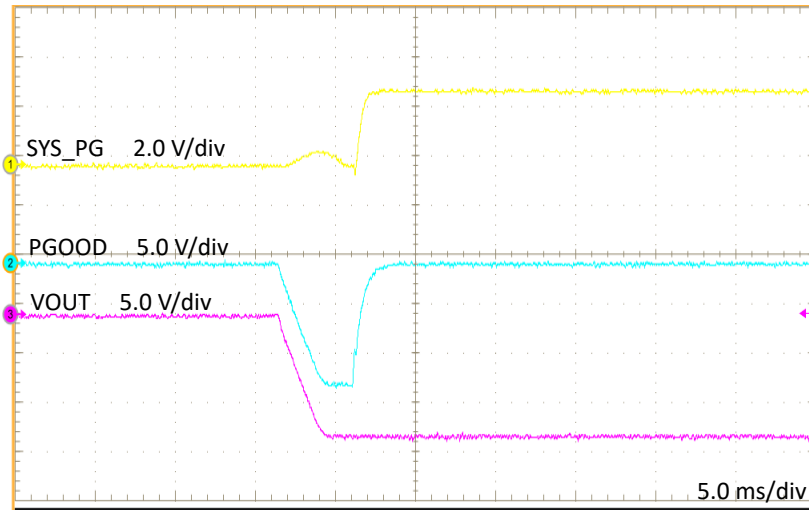


图 5-5. 启动时的 PG 引脚电平转换器

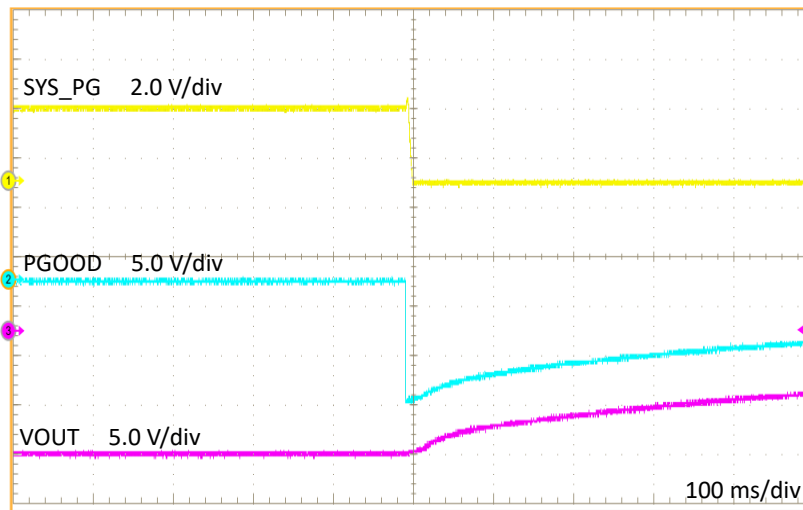


图 5-6. 关断时的 PG 引脚电平转换器

6 结论

TPSM365R6 降压电源模块可配置为 **IBB** 拓扑，从而通过切换输出和接地连接来生成负输出电压。输入电压范围会降低，因为该器件现在将基准点设置为负输出电压，而不是接地。此外，电感器峰值电流要高得多，从而有效地降低了所有输出电压的建议最大输出电流工作范围。将原始降压拓扑转换为 **IBB** 拓扑将导致输入电压范围减小和最大输出电流。本应用报告介绍了 **IBB** 拓扑以及如何选择合适的外部元件来保持系统稳定。测量并提供来自测试电路的数据。

7 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [利用降压稳压器创建逆变电源](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI), [TPSM365R6 65V、0.6A 同步降压转换器电源模块](#) 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [在反相降压/升压拓扑中使用降压转换器](#), 模拟设计期刊。
4. 德州仪器 (TI), [使用 TPS5430 作为反相降压/升压转换器](#) 应用手册。
5. 德州仪器 (TI), [LMZM33602 和 LMZM33603 的反相应用](#) 应用手册。

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