



## 摘要

在反相降压/升压 (IBB) 拓扑中使用时，TPS6291xEVM-161 (BSR161) 有助于评估 TPS6291x 采用小型 2mm × 2mm QFN 封装、2A 和 3A 引脚对引脚兼容的低噪声 ( $< 20 \mu V_{RMS}$ ) 和低纹波 ( $< 10 \mu V_{RMS}$ ) 降压转换器。BSR161-001 使用 3A TPS62913 通过 3V 至 11.5V 的输入电压输出 -5V 的输出电压。由于 TPS6291x 的噪声极低，因此可高效替代需要负输出电压的噪声敏感型电路中的低压降 (LDO) 线性稳压器，这些电路包括用于电信基础设施的光学模块，用于医疗、测试和测量以及航空航天和国防应用的仪表和运算放大器。

## 内容

1 引言	2
1.1 性能规格	2
1.2 EVM 特性和修改	2
2 设置	6
2.1 输入/输出连接器说明	6
2.2 纹波测量	6
3 测试结果	8
4 电路板布局	11
5 原理图和物料清单	14
5.1 原理图	14
6 物料清单	15

## 插图清单

图 1-1. 按输入电压和输出电压确定的输出电流限制	3
图 1-2. 环路响应测量修改 (底层)	5
图 1-3. 环路响应测量修改 (顶层)	5
图 2-1. 输出电压纹波，在 J4 (第一个 LC 滤波器) 处测量	7
图 2-2. 输出电压纹波，在 J5 处测量 (铁氧体磁珠之后)	7
图 3-1. 1MHz $f_{SW}$ 下 -5V 输出的效率	8
图 3-2. 在空载条件下启动	8
图 3-3. 在 1A 负载条件下启动	9
图 3-4. 在空载条件下关断	9
图 3-5. 在 1A 负载下关断	10
图 3-6. 环路响应测量 ( $V_{IN} = 5V$ , $V_{OUT} = -5V$ , $I_{OUT} = 1000mA$ , 移除铁氧体磁珠)	10
图 4-1. 顶层装配图	11
图 4-2. 顶层	11
图 4-3. 内层 1	12
图 4-4. 内层 2	12
图 4-5. 底层	13
图 4-6. 底层 (镜像)	13
图 5-1. TPS62913-IBB-EVM 原理图	14

## 表格清单

表 1-1. TPS62913EVM-161 性能规格总结	2
表 6-1. TPS62913-IBB-EVM 物料清单	15

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

TPS6291x 系列器件是一种低噪声和低纹波同步降压转换器，采用小型 2mm × 2mm × 1mm QFN 封装。此系列中的两个不同器件支持 2A 或 3A 输出电流。只需对输入和输出连接进行一些简单的变更，几乎任何普通的降压稳压器都可以转换为 IBB。TPS6291x 系列器件独特，包含低噪声滤波电容器和集成铁氧体磁珠补偿。铁氧体磁珠配置对于在整个负载电流范围内实现低纹波和输出电压稳定性至关重要。本应用报告详细介绍了如何使用 TPS6291x 从降压稳压器转换到 IBB、转换器的操作以及成功实现电源应用需要考虑的事项。

### 1.1 性能规格

表 1-1 提供了 TPS6291xEVM-161 性能规格的汇总。

表 1-1. TPS62913EVM-161 性能规格总结

规格	测试条件：	最小值	典型值	最大值	单位
输入电压	JP2 打开或跨 1MHz 和 S-CONF	3	5	12	V
输出电压设定点			-5		V
输出电流	根据图 1-1，在 VIN = 3V 时，对于更高的 VIN，输出电流更高	0		0.8	A
S-CONF (R4) 设置	1MHz 同步可用，无展频，输出放电启用				

### 1.2 EVM 特性和修改

此 EVM 的印刷电路板 (PCB) 旨在适应用户所做的一些修改。可添加额外输出电容器。可使用反馈电阻器来调整输出电压，可改变软启动时间和低频噪声滤波，可添加前馈电容器，并且可改变开关频率、输出放电设置和展频设置。最后，在对电路板进行一些修改后，测量铁氧体磁珠之前的环路响应。有关各种设置的更多信息，请参阅器件数据表。

当修改输出电压时，这会影响到平均电感器电流和输出电流。对于 IBB，因为电感器并不总是提供负载电流，所以平均电感器电流不再等于平均输出电流。电感器仅在关断时间（开关周期的 1-D）内为负载供电。方程式 1 可用于计算平均电感器电流：

$$I_L = \frac{I_O}{(1-D)} \quad (1)$$

使用方程式 2 可计算反相降压/升压转换器的工作占空比。

$$D = \frac{V_{OUT}}{(V_{OUT} - V_{IN})} \times \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

其中  $\eta$  是工作点的效率。

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预估值。使用方程式 3 计算峰峰值电感纹波电流。

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN} \times D}{(f_{SW} \times L)} \quad (3)$$

其中 D 是占空比， $f_{SW}$  是以 Hz 为单位的开关频率，L 是以 H 为单位的电感， $V_{IN}$  是相对于地的输入电压。

方程式 4 计算最大电感器电流。

$$I_{L,Max} = I_{L,A} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4)$$

例如，对于 -5V 的输出电压、3.3V 的输入电压、2.2  $\mu$ H 的电感和 1MHz 的开关频率，以下计算根据 TPS62913 3.7A 的最小电流限制值计算出允许的最大输出电流。保守估计，效率项预计为 85%。

$$D = \frac{-5}{-5 - 3.3} \times \frac{1}{0.85} = 0.709 \quad (5)$$

$$\Delta I_L = \frac{3.3 \times 0.709}{1 \text{ MHz} \times 2.2 \mu\text{H}} = 1.06\text{A} \quad (6)$$

重新整理方程式 7，将  $I_{L,Max}$  设置为等于数据表中指定的最小电流限制值，可得出：

$$I_{L(A)vg} = 3.7 - \frac{1.06}{2} = 3.17 \quad (7)$$

然后在方程式 8 中使用此结果来计算可实现的最大输出电流：

$$I_{OUT} = 3.17 \times (1 - 0.709) = 922 \text{ mA} \quad (8)$$

图 1-1 绘制了不同输出电压 (-1.8V、-3.6V、-5V) 和输入电压组合下的最大输出电流，电感值为 2.2uH，开关频率为 1MHz。

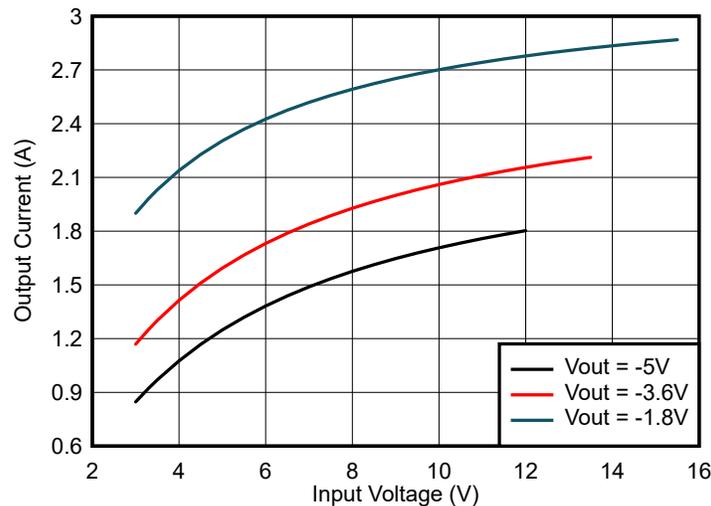


图 1-1. 按输入电压和输出电压确定的输出电流限制

IBB 拓扑的输入和输出电压受到 IC 建议工作电压的限制，因为 IC 上的输入电压是从 VIN 到 VOUT，而不是从 VIN 到 GND。查看最大输出电流与 VIN 间的关系时，这些值绘制为 17V + VOUT，因此对于 -5V 输出，最大输入电压为 17V - 5V，即 12V。

### 1.2.1 输入和输出电容器

为附加输入电容器提供了 C1。此电容器不是正常运行所必需，但可用于降低输入电压纹波，并且因为通常使用长导线进行评估，所以在 EVM 中包含该电容器。在实际实施中，通常不需要这个大容量输入电容器。

对于反相降压/升压配置，环路的交叉频率必须比 RHP 零点低约 4 倍或更多。为附加大容量输出电容器提供了 C12。这些电容器不是正常运行所必需，但可用于减小交叉频率。C13 和 C18 用于高频率旁路电容器。

### 1.2.2 启用电平转换器和可调节阈值电压

由于 VOUT 在此拓扑中是 IC 接地，因此 EN 引脚必须以 VOUT (而非接地) 为基准。在降压配置中，TPS6291x 使能引脚的指定典型阈值电压为 1.0V (高电平) 和 0.9V (低电平)。在 IBB 配置中，VOUT 电压为基准电压，因此高电平阈值为 1.0V + VOUT，低电平阈值为 0.9V + VOUT。例如，如果 VOUT = -5V，则在电压高于 -4V 时，VEN 视为高电平；电压低于 -4.1V 时，视为低电平。这种行为会导致难以启用或禁用该器件，因为大多数应用没有负电压来启用和禁用器件。该解决方案是在 EVM 上实施逻辑电平转换器。

正常驱动 EN 信号的正信号不直接连接到 TPS6291x 的 EN/SYNC 引脚，而是通过 J2 连接到 Q1A 的栅极。当 Q1A 关断 (J2 跳线安装在 EN 和 GND 之间) 时，Q1B 的 VGS 为 0V，并也保持关断。在这种状态下，EN 引脚检测到 VOUT 低于低电平阈值，并禁用该器件。

当 J2 跳线安装在 EN 和 VIN 之间时，即有足够的正电压来导通 Q1A ( MOSFET 数据表中指定的最小 VGS )，Q1B 的栅极通过 Q1A 拉低。这会将 Q1B 的 VGS 驱动为负，并导通 Q1B。因此，VIN 通过 Q2 连接到 EN，且 EN/SYNC 引脚高于高电平阈值，从而使器件导通。确保 Q1B 的 VGD 在启用和禁用状态期间均保持在 MOSFET 额定值范围内，否则会损坏 MOSFET。R2 是有源放电，可在移除 J2 跳线后加速恢复为 0V。

可修改 R3 和 R4 来设置用户可选且使 IC 导通的输入电压。

### 电源良好电平转换器

TPS6291x 具有电源正常 (PG) 功能，可指示输出电压何时达到适当电平。PG 引脚是开漏输出，需要使用一个上拉电阻器。因为在 IBB 配置中 VOUT 是 IC 地，所以 PG 引脚以 VOUT 而非地为基准，这意味着器件在 PG 为低电平时将其拉至 VOUT。这会导致在无法承受 PG 检测电路上负电压的系统中出现问题。使用与 EN/SYNC 实施类似的电平转换器电路。

使用 PG 功能时，必须在 J6 上施加电压 (VCC)。此电压不得驱动为高于  $18V + VOUT$ 。因此，对于 -5V 输出，VCC 必须小于 12V。

10k 电阻器上拉通过 Q2A 连接到器件的 PG 引脚。当 PG 引脚输出为低电平时，Q2A 为低电平，导致 Q2B 看到 VCC，进而导致 SYS\_PG 信号拉至 GND。这可以在 J7 的引脚 1 上看到。

当 PG 引脚输出为高电平时，Q2A 为高电平，导致 Q2B 看到 VOUT，从而导致 SYS\_PG 信号拉至 VCC。

### 1.2.3 NR/SS 电容器

C5 设置软启动时间和低频噪声过滤。可修改该电容来设置其他软启动时间和噪声过滤等级。有关详细信息，请参阅 [TPS62913](#) 数据表。

### 1.2.4 前馈电容器

提供的 C6 可作为前馈电容器 ( $C_{FF}$ )。安装该电容器能够降低低频噪声，特别是对于输出电压更高的情况。

### 1.2.5 S-CONF 电阻器

当 J1 中未安装跳线时，R1 选择开关频率。R1 选择展频设置、输出放电和时钟同步设置。可以更改此电阻器，也可以将跳线与 J1 一起使用，以便选择 VIN (2.2MHz) 或 GND (1MHz) 设置。有关详细信息，请参阅 [TPS62913](#) 数据表。

### 1.2.6 环路响应测量

可通过略微改变电路来测量环路响应。首先，在 PCB 背面的 R7 电阻器垫上安装一个  $49.9\Omega$  电阻器，在 PCB 背面的 R8 电阻器垫上安装一个  $0\Omega$  电阻器。将这些电阻器垫间隔开，以便安装 0603 型电阻器。第二，切断  $49.9\Omega$  电阻器下方底层的布线。[图 1-2](#) 展示了这些更改。第三，切断引脚 3 和 C7 上过孔之间顶层的一小段布线。[图 1-3](#) 显示了此更改。最后，将铁氧体磁珠 (FB1) 更换为  $0\Omega$  电阻器。必须移除第二个 LC 滤波器，从而断开完整的反馈回路并测量环路响应。做出这些更改后，交流信号 (建议使用 10mV 峰-峰值幅度) 可通过所添加的  $49.9\Omega$  电阻器注入控制环路。[图 3-6](#) 显示了此测试的结果。

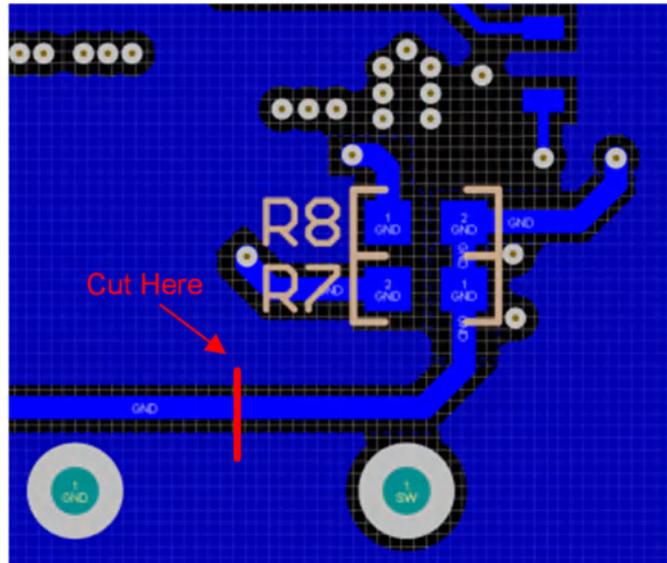


图 1-2. 环路响应测量修改 (底层)

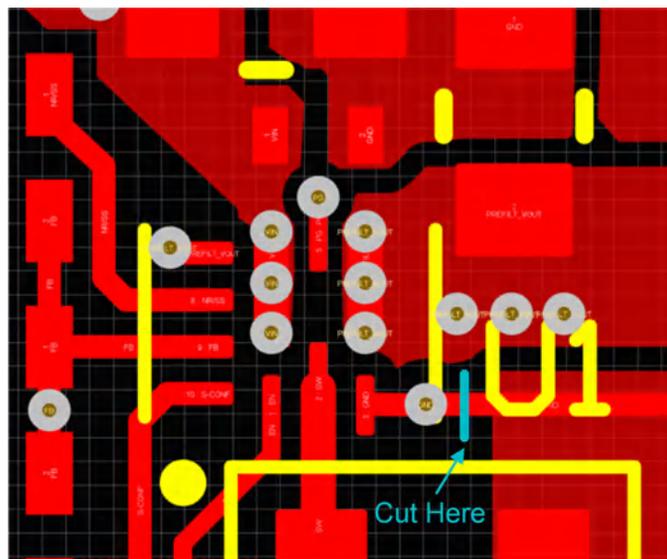


图 1-3. 环路响应测量修改 (顶层)

### 1.2.7 单个 LC 滤波器用途

对于不需要超低输出电压纹波的应用，TPS6291x 可以在没有第二个 LC 滤波器的情况下工作。若要使用单个 LC 滤波器工作，请用  $0\ \Omega$  电阻器替换 FB1。可以移除铁氧体磁珠之后的电容器，以便减少输出电容量，但电容量必须足够使 FCO 保持在比 RHPZ 低四倍的水平。

## 2 设置

本节介绍了如何正确使用 EVM。

### 2.1 输入/输出连接器说明

<b>J3、引脚 1 和引脚 2 - <math>V_{IN}</math></b>	从 EVM 输入电源的正输入连接。
<b>J3、引脚 3 和引脚 4 - <math>S+/S-</math></b>	输入电压感测连接。测量此处的输入电压。
<b>J3、引脚 5 和引脚 6 - <b>GND</b></b>	EVM 从输入电源的返回连接。
<b>J8、引脚 1 和引脚 2 - <b>GND</b></b>	输出返回连接
<b>J8、引脚 3 和引脚 4 - <math>S+/S-</math></b>	输出电压感测连接。测量此处的输出电压。
<b>J8、引脚 5 和引脚 6 - <b>VOUT_FILT</b></b>	滤波输出连接。
<b>J7 - <b>SYS_PG/GND</b></b>	<b>SYS_PG</b> 输出位于此接头的引脚 1 上，引脚 2 上有一个便利的接地。
<b>J6 - <b>VCC/GND</b></b>	用于 <b>PG</b> 上拉的 <b>VCC</b> 源连接在引脚 2 上有一个便利的接地。此外部供电电压应小于 $18V + V_{OUT}$ 。
<b>J4 - <b>PREFILT_V<sub>OUT</sub></b> 纹波测量</b>	使用此 <b>SMA</b> 连接器测量第二个 <b>LC</b> 滤波器前的输出电压纹波。
<b>J5 - <b>V<sub>OUT_FILT</sub></b> 纹波测量</b>	使用此 <b>SMA</b> 连接器测量第二个 <b>LC</b> 滤波器后的输出电压纹波。
<b>J2 - <b>EN</b></b>	<b>EN</b> 引脚输入跳线。使用提供的跳线跨接 <b>VIN</b> 和 <b>EN</b> ，以便导通 <b>IC</b> 。使用跳线跨接 <b>GND</b> 和 <b>EN</b> ，以便关断 <b>IC</b> 。此 <b>IBB</b> 配置不支持同步功能。
<b>J1 - <b>S-CONF</b></b>	<b>S-CONF</b> 引脚输入跳线。将提供的跳线置于 <b>2.2MHz</b> 和 <b>S-CONF</b> 之间，以 <b>2.2MHz</b> 开关频率操作 <b>IC</b> ，而无展频或输出放电。将跳线置于 <b>1MHz</b> 和 <b>S-CONF</b> 之间，以 <b>1MHz</b> 开关频率操作 <b>IC</b> ，无展频或输出放电。移除跳线，从而使用由 <b>R1</b> 设置的 <b>S-CONF</b> 设置来操作 <b>IC</b> 。

---

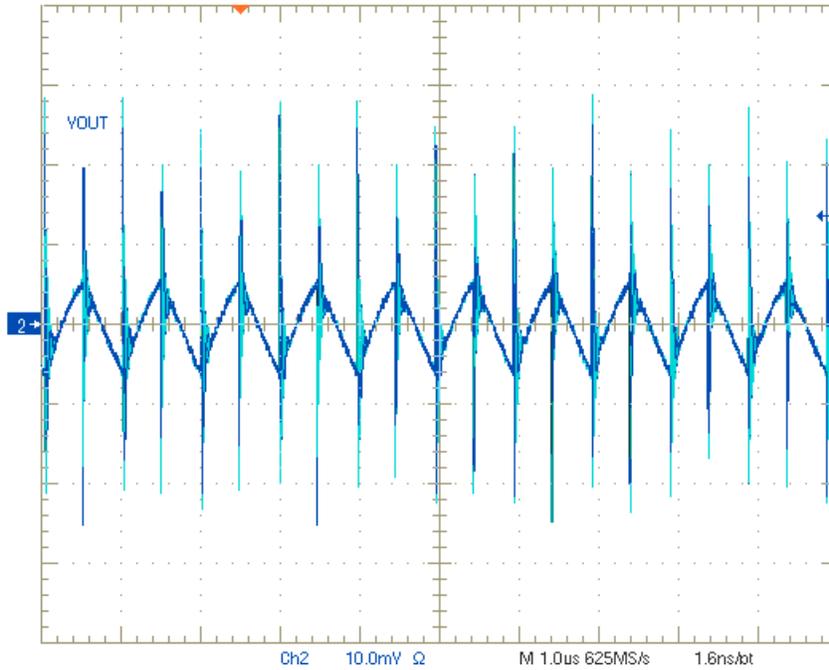
#### 备注

- 在启用 **IC** 之前设置 **J1** 跳线位置。启用 **IC** 后更改 **J1** 不起作用。
  - 使用 **2.2MHz** 设置时，确保输入电压和输出电压满足设备数据表中的最短导通时间要求。
- 

### 2.2 纹波测量

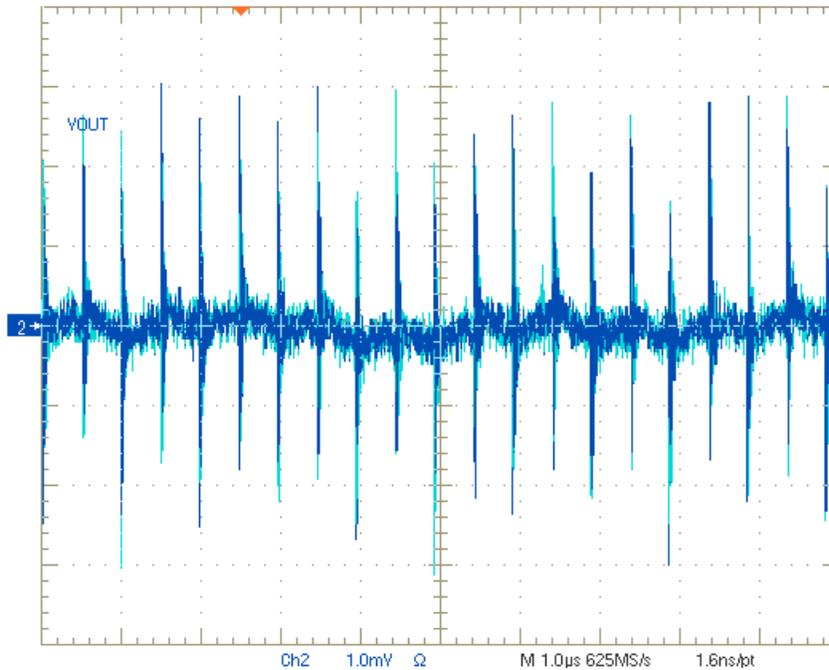
**TPS6291x** 的极低噪声和低纹波电平需要一个低噪声测试装置来精确测量输出电压纹波。**SMA** 连接器 **J4** 和 **J5** 应用于测量第二个 **LC** 滤波器前后的输出电压纹波。请勿使用带有高阻抗终端的普通 **10x** 示波器探头来连接示波器。相反，通过直流阻断器用同轴电缆将 **SMA** 连接器直接连接到示波器。直流阻断器允许在示波器上设置 **V/div** 最小值以查看纹波。为防止噪声拾取和阻挡同轴电缆上的反射，示波器应设置为全带宽 (**BW**) 和带有 **50 Ω** 终端的直流耦合。

图 2-1 和图 2-2 显示了正确的测量设置和输出电压纹波结果。**J4** 处的测量在铁氧体磁珠滤波器之前，**J5** 处的测量在铁氧体磁珠滤波器之后。



$V_{IN} = 5V$  ,  $V_{OUT} = -5V$  ,  $I_{OUT} = 1000mA$  ,  $FSW = 1MHz$  , 全 BW , 直流耦合 , 带直流阻断器的  $50\Omega$  终端

图 2-1. 输出电压纹波, 在 J4 ( 第一个 LC 滤波器 ) 处测量



$V_{IN} = 5V$  ,  $V_{OUT} = -5V$  ,  $I_{OUT} = 1000mA$  ,  $FSW = 1MHz$  , 全 BW , 直流耦合 , 带直流阻断器的  $50\Omega$  终端

图 2-2. 输出电压纹波, 在 J5 处测量 ( 铁氧体磁珠之后 )

### 3 测试结果

TPS62913-IBB-EVM 的输出电压设置为 -5V，但可以通过反馈电阻器轻松修改，以获得其他输出电压。下面的效率曲线显示了 3.3V、5V 和 11.5V 输入电压下的性能。

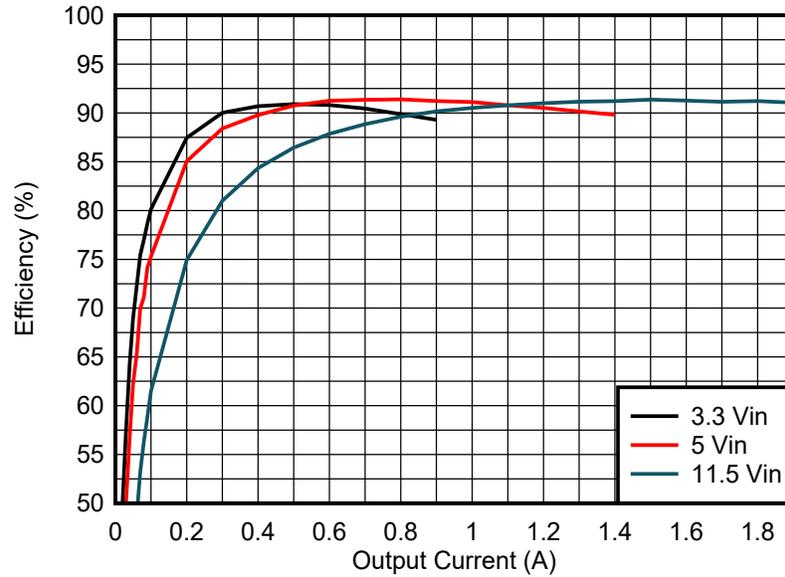


图 3-1. 1MHz  $f_{sw}$  下 -5V 输出的效率

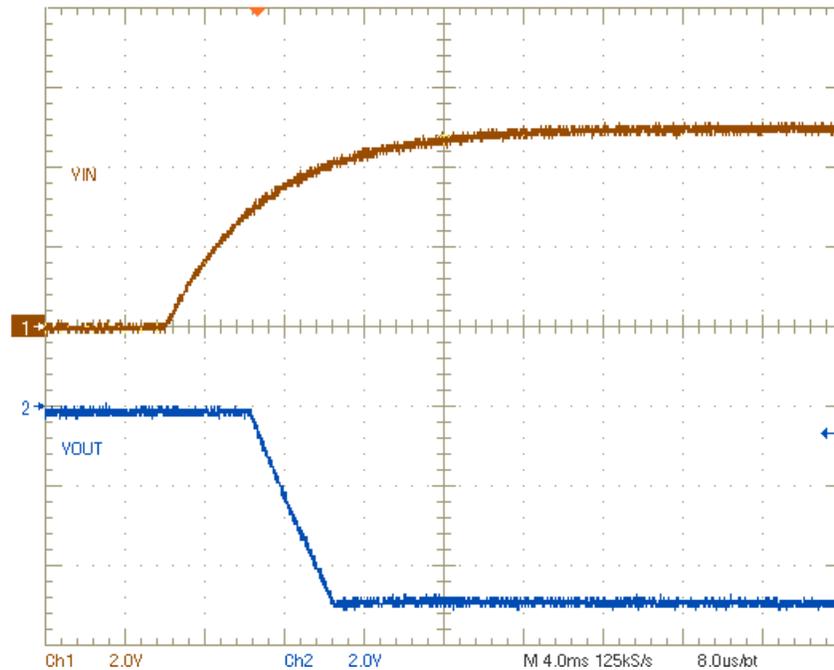


图 3-2. 在空载条件下启动

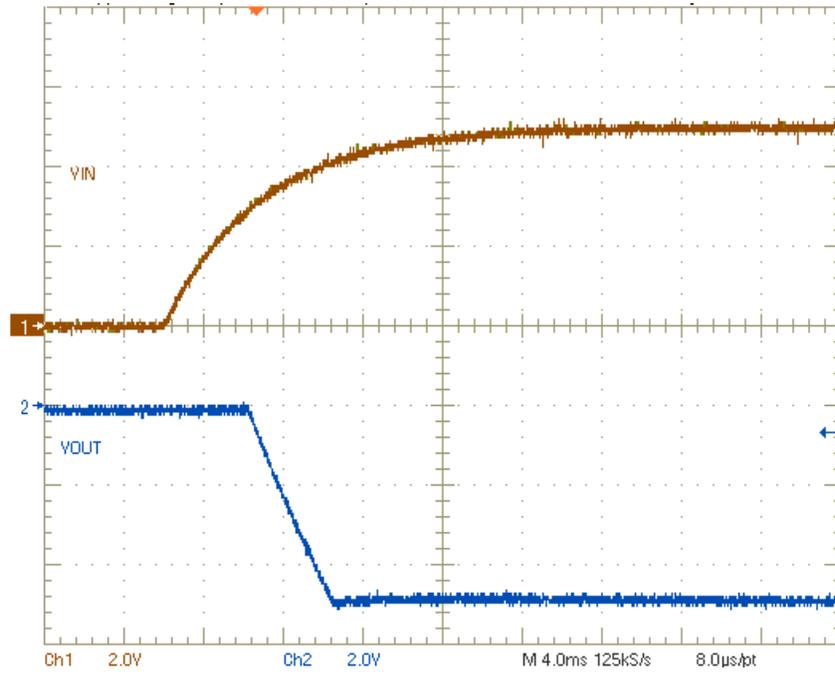


图 3-3. 在 1A 负载条件下启动

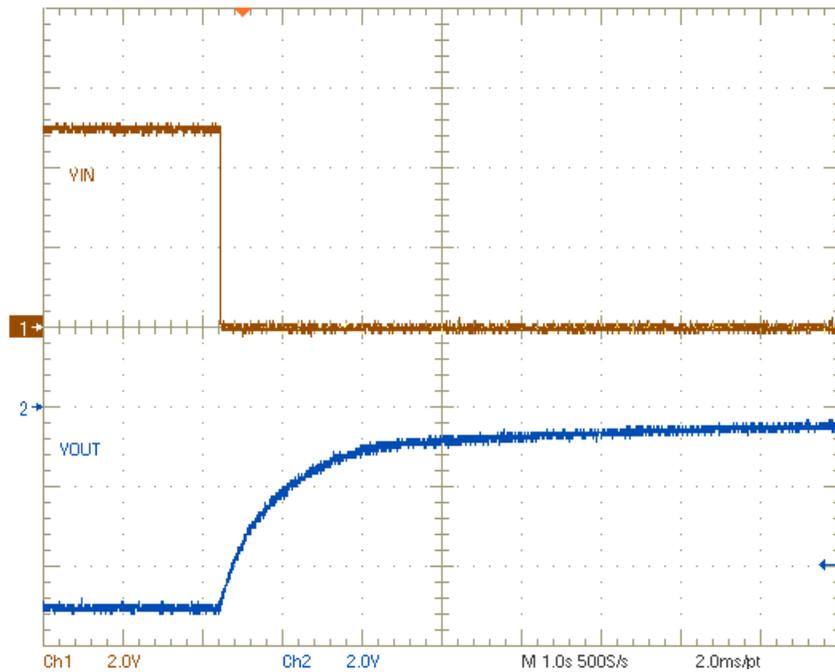


图 3-4. 在空载条件下关断

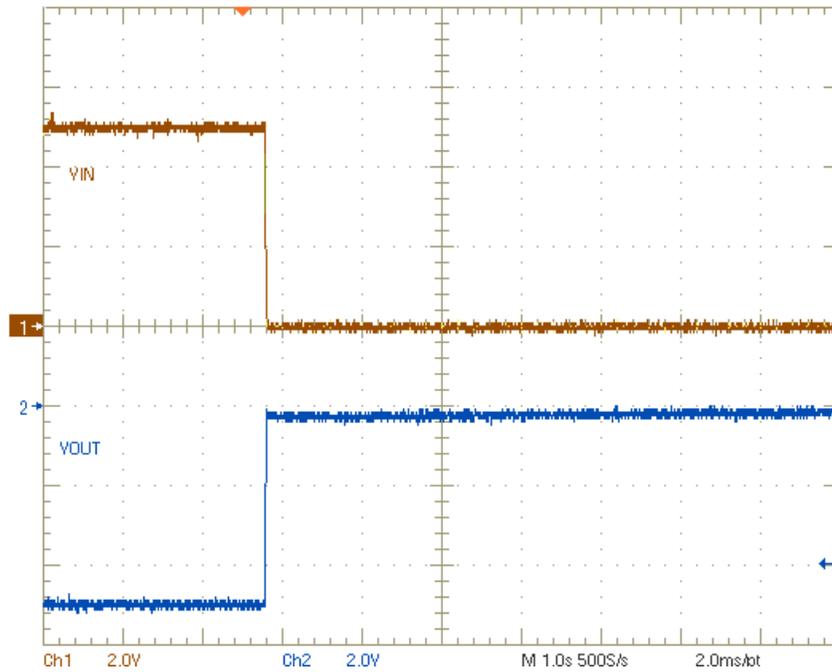


图 3-5. 在 1A 负载下关断

图 3-6 显示了环路响应测量。

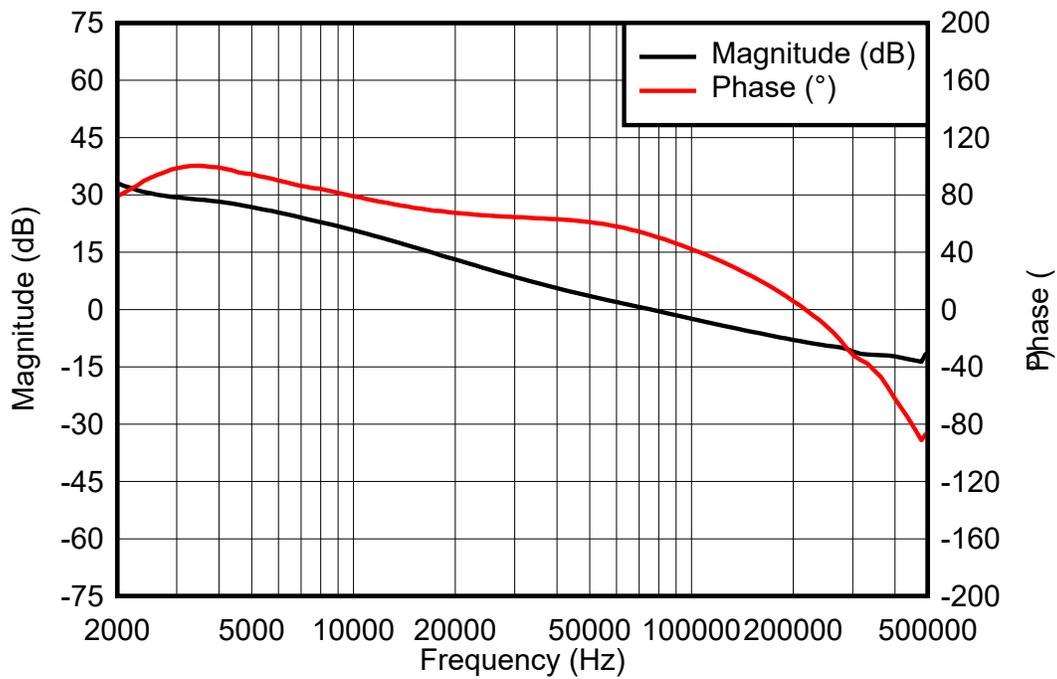


图 3-6. 环路响应测量 ( $V_{IN} = 5V$ ,  $V_{OUT} = -5V$ ,  $I_{OUT} = 1000mA$ , 移除铁氧体磁珠)

## 4 电路板布局

本节在图 4-1 至图 4-6 中提供了 EVM 电路板布局和图示。Gerbers 可从 [EVM 产品页面](#) 获取。

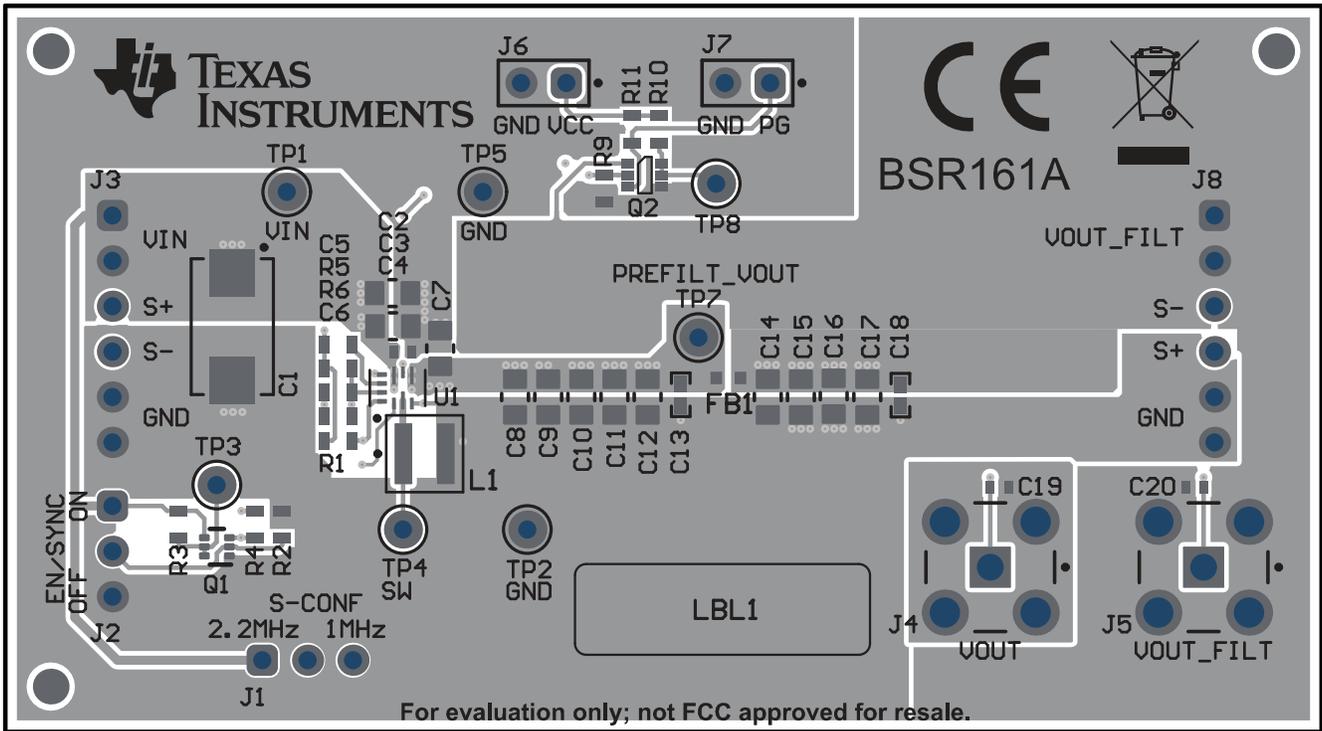


图 4-1. 顶层装配图

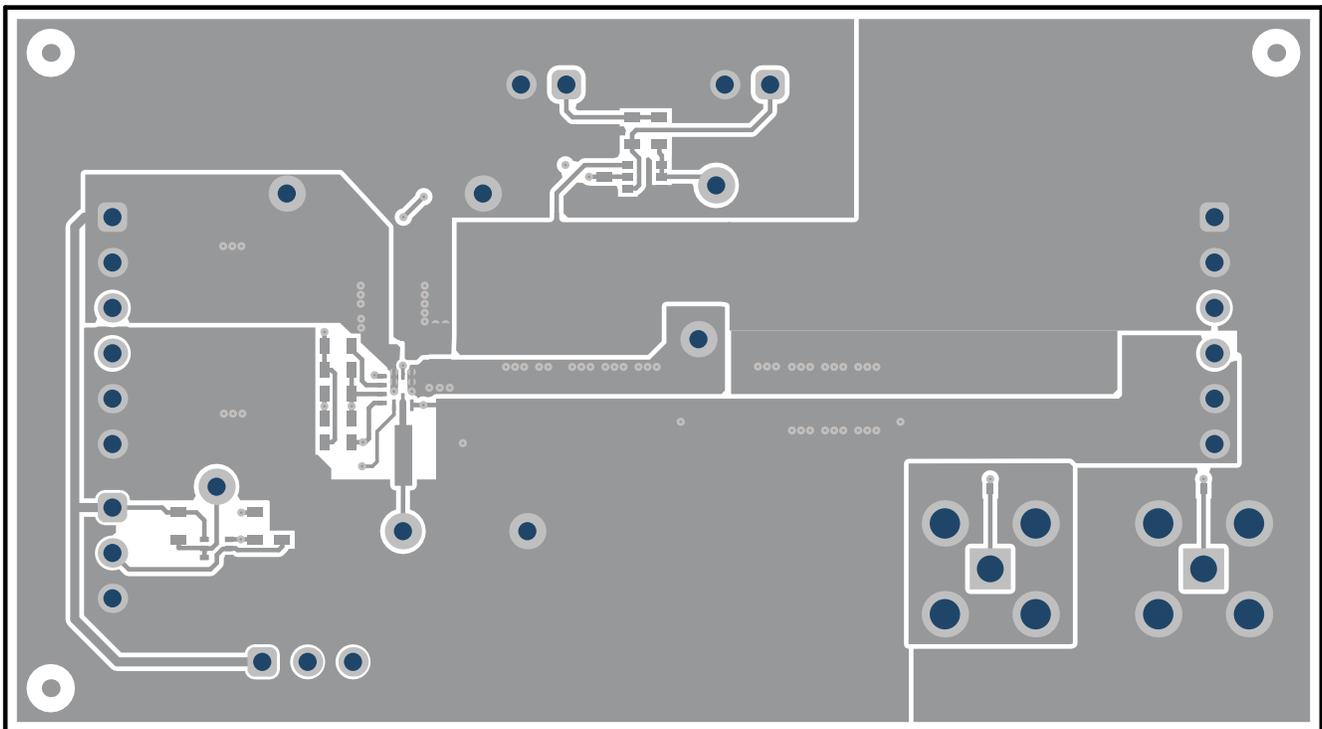


图 4-2. 顶层

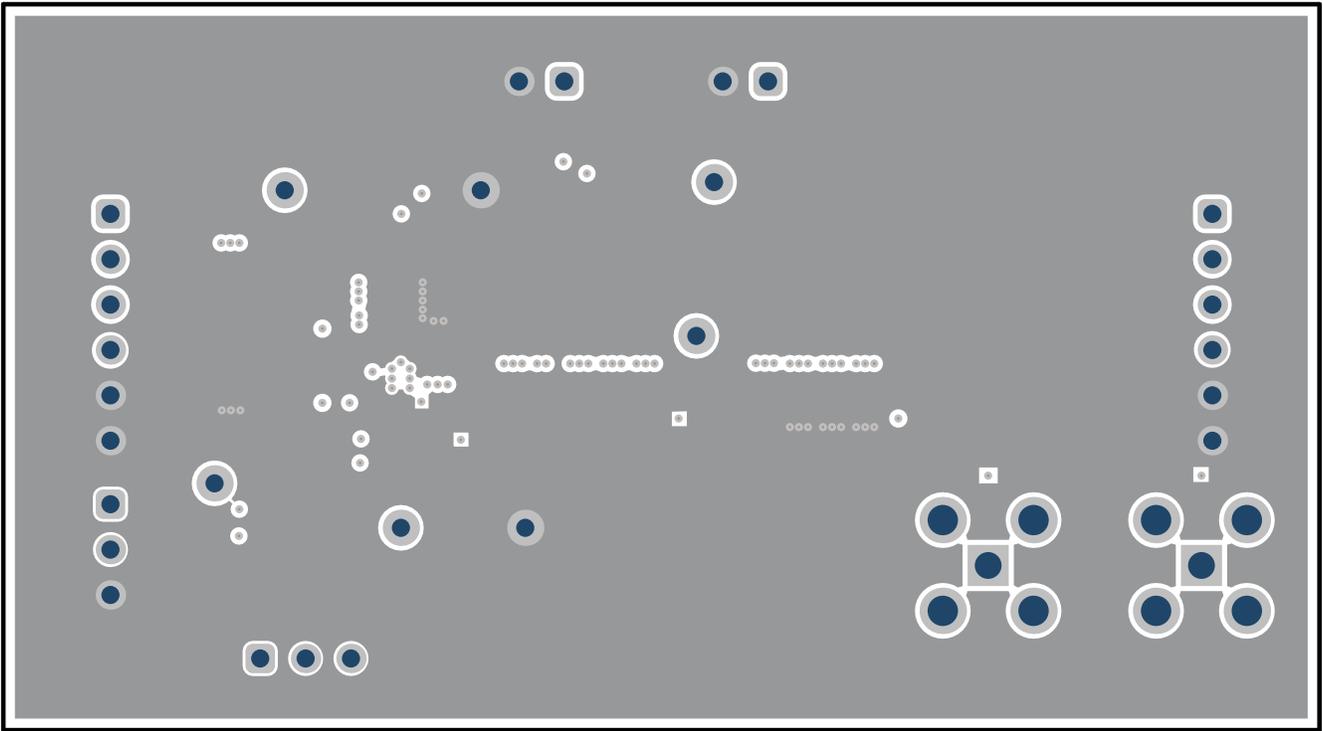


图 4-3. 内层 1

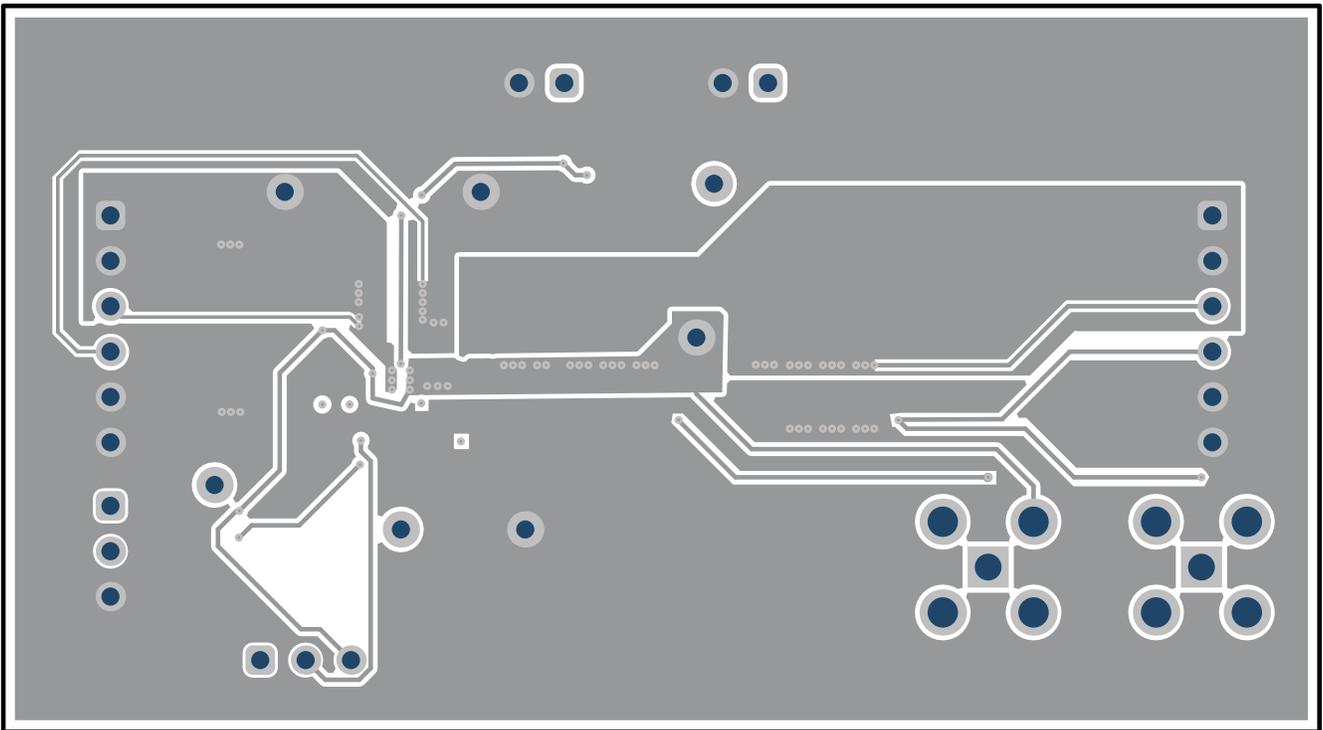


图 4-4. 内层 2

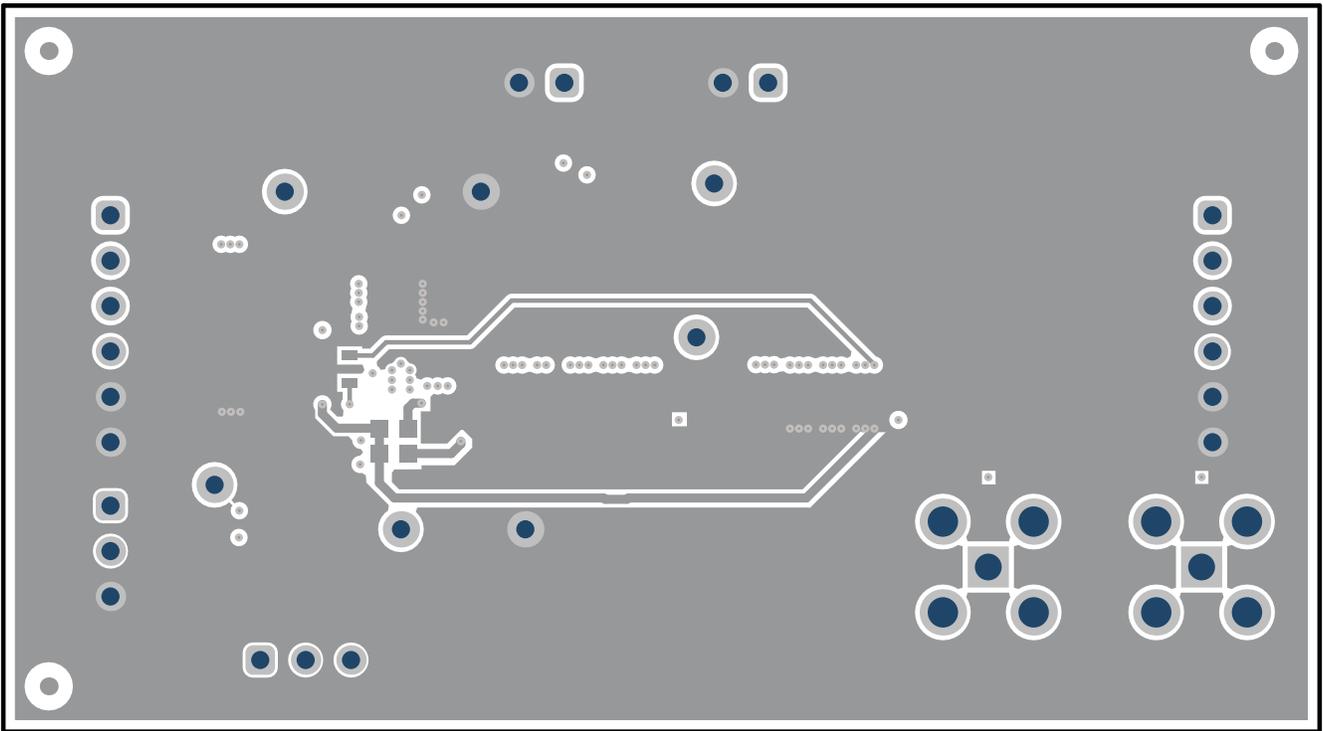


图 4-5. 底层

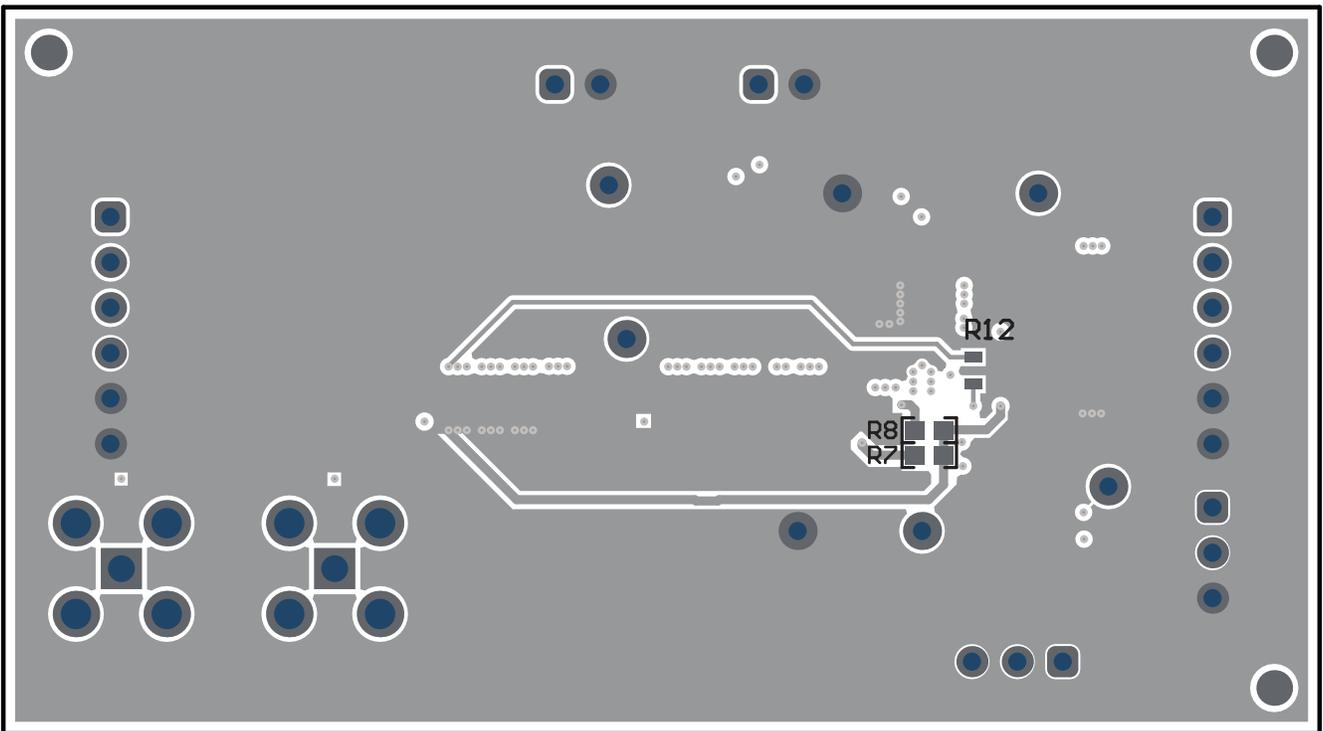


图 4-6. 底层 ( 镜像 )

## 5 原理图和物料清单

本节提供了 EVM 原理图和物料清单 (BOM)。

### 5.1 原理图

图 5-1 所示为 EVM 原理图。

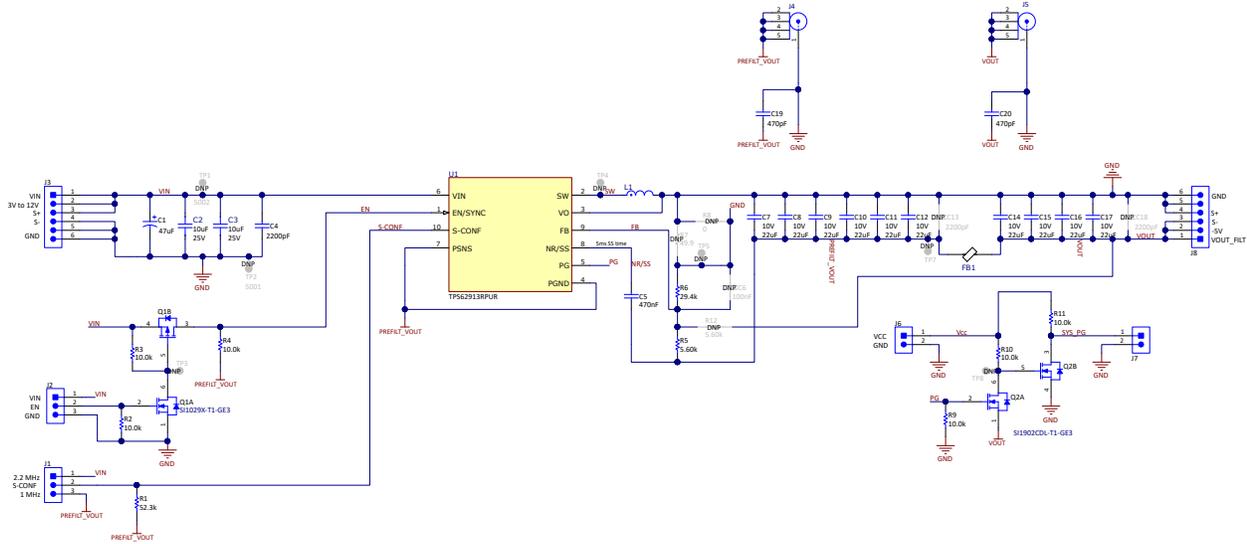


图 5-1. TPS62913-IBB-EVM 原理图

## 6 物料清单

表 6-1 列出了该 EVM 的物料清单 (BOM)。

表 6-1. TPS62913-IBB-EVM 物料清单

-001	参考标识符	说明	封装	器件型号	制造商
1	C4	电容, 陶瓷, 2200pF, 50V, +/-10%, X7R	0402	GRM155R71H222KA01D	muRata
2	C2、C3	电容, 陶瓷, 10μF, 25V, +/-10%, X7S	0805	C2012X7S1E106K125AC	TDK
10	C7、C8、C9、C10、C11、C12、C14、C15、C16、C17	电容, 陶瓷, 22μF, 10V, +/-20%, X7S	0805	C2012X7S1A226M125AC	TDK
1	C5	电容, 陶瓷, 0.47μF, 25V, +/-10%, X7R	0603	C1608X7R1E474K080AE	TDK
1	C1	电容, 钽, 47μF, 35V, +/-10%, 0.3Ω	7343-43	T495X476K035ATE300	Kemet
2	C19, C20	电容, 陶瓷, 470pF, 50V, +/-5%, C0G/NP0	0402	GRM1555C1H471JA01D	muRata
1	FB1	铁氧体磁珠, 100MHz 处 8.5Ω, 4mΩ DCR, 8A	0603	BLE18PS080SN1	muRata
1	L1	电感器功率屏蔽线绕 2.2μH 20% 复合 8.7A 19.5mΩ DCR	4mm × 4mm	XGL4020-222MEC	Coilcraft
1	R1	电阻, 52.3kΩ, 1%, 0.1W	0603	Std	Std
1	R5	电阻, 5.60kΩ, 1%, 0.1W	0603	Std	Std
1	R2、R3、R4、R9、R10、R11	电阻, 10.0kΩ, 1%, 0.1W	0603	Std	Std
1	R6	电阻, 29.4kΩ, 1%, 0.1W	0603	Std	Std
1	U1	3 V 至 17V, 3A 低噪声 (20μVRMS) 和低纹波 (200μVPP) 降压转换器	2mm x 2mm	TPS62913RPUR	德州仪器 (TI)

## 重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

## 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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司