



摘要

本用户指南介绍了如何操作 UCC28781EVM-053 以及如何评估该器件的各种性能指标。UCC28781EVM-053 实现了高压、宽输入电压、单输出 ZVSF 电源转换器的典型应用，采用 50V 至 500V 直流输入生成 15V 输出电源轨，从而提供高达 4A 的负载电流。该 EVM 还包括一种可在 90 V_{RMS} 至 264 V_{RMS} 的全球标准交流输入范围内运行的方法。

内容

1 引言.....	2
2 通用德州仪器 (TI) 高压评估模块 (TI HV EVM) 用户安全指南.....	3
3 EVM 说明.....	4
4 EVM 的电气性能规格.....	5
5 EVM 的原理图.....	7
6 通过直流或交流电源运行 EVM.....	9
6.1 典型应用.....	9
6.2 将 EVM 与直流电压源搭配使用.....	9
6.3 将 EVM 与交流电压源搭配使用.....	9
7 测试设置.....	10
7.1 测试设置要求.....	10
7.2 测试设置图.....	12
7.3 端子和测试点.....	13
8 性能数据和典型特性曲线.....	14
8.1 采用直流输入时的效率测量表.....	14
8.2 采用交流输入时的效率测量表.....	15
8.3 采用直流输入电压时的效率图 (典型结果)	16
8.4 各种工作模式下的开关频率.....	17
8.5 主要开关波形和工作模式负载电流.....	17
8.6 直流和交流输入条件下满负载时的热像图 (15V , 4.0A)	19
9 变压器详细信息.....	21
10 EVM 装配图和布局.....	22
11 物料清单.....	24
12 修订历史记录.....	26

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

UCC28781EVM-053 是一款采用 UCC28781-Q1 控制器的 60W、15V 评估模块 (EVM)，用于评估在牵引逆变器及其他应用中用作偏置电源的高压直流输入零电压开关反激式 (ZVSF) 转换器。该 EVM 的用途是进行评估，不是最终产品。

该 EVM 可将 50V 至 500V 范围的直流输入电压降压转换为 15V 隔离式输出。在 250V 至 500V 的输入电压下，输出电流的最大额定值为 4A；在 50V 至 250V 的输入电压下，最大值则会降低至 2A。高达约 133% 额定功率的过功率保护持续时间限制为 160ms。

此外，该 EVM 可以采用电压为 $90V_{RMS}$ 至 $264V_{RMS}$ 的 **隔离式** 交流电源供电，方法是将交流整流输出连接到直流输入端，本用户指南稍后会对此进行介绍。

2 通用德州仪器 (TI) 高压评估模块 (TI HV EVM) 用户安全指南



务必遵循 TI 的安装和应用说明，包括在建议的电气额定电压和功率限制范围内使用所有接口组件。务必采取电气安全防护措施，这样有助于确保自身和周围人员的人身安全。如需更多信息，请联系 TI 产品信息中心，网址为 <http://support/ti.com>。

保存所有警告和说明以供将来参考。

WARNING

务必遵循警告和说明，否则可能引发电击和灼伤危险，进而造成财产损失或人员伤亡。

TI HV EVM 一词是指通常以开放式框架、敞开式印刷电路板装配形式提供的电子器件。该器件严格用于开发实验室环境，仅供了解开发和应用高压电路相关电气安全风险且接受过专门培训、具有专业知识背景的合格专业用户使用。德州仪器 (TI) 严禁任何其他不合规的使用和/或应用。如果不满足合格要求，应立即停止进一步使用 HV EVM。

1. 工作区安全

- a. 保持工作区整洁有序。
- b. 每次电路通电时，合格观察员都必须在场监督。
- c. TI HV EVM 及其接口电子元件通电区域必须设有有效的防护栏和标识，指示可能存在高压操作，以避免意外接触。
- d. 开发环境中使用的所有接口电路、电源、评估模块、仪器、仪表、示波器和其他相关装置如果超过 50Vrms/75VDC，则必须置于紧急断电 EPO 保护电源板内。
- e. 使用稳定且不导电的工作台。
- f. 使用充分绝缘的夹钳和导线来连接测量探针和仪器。尽量不要徒手进行测试。

2. 电气安全

作为一项预防措施，工程实践中通常需假定整个 EVM 可能存在用户完全可接触到的高电压。

- a. 执行任何电气测量或其他诊断测量之前，需将 TI HV EVM 及其全部输入、输出和电气负载断电。再次确认 TI HV EVM 已安全断电。
- b. 确认 EVM 断电后，根据所需的电路配置、接线、测量设备连接和其他应用需求执行进一步操作，同时仍假定 EVM 电路和测量仪器均带电。
- c. EVM 准备就绪后，根据需要 will EVM 通电。

WARNING

EVM 通电后，请勿接触 EVM 或其电路，它们可能存在高压，会造成电击危险。

3. 人身安全

- a. 穿戴人员防护装备（例如乳胶手套或具有侧护板的安全眼镜）或将 EVM 放置于带有联锁装置的透明塑料箱中，避免意外接触。

安全使用限制条件：

勿将 EVM 作为整体或部分生产单元使用。

3 EVM 说明

UCC28781EVM-053 采用 4 层印刷电路板 (PCB)，其中通孔元件位于顶层，而表面贴装元件位于底层。分接插槽内包含实际的转换电路。此 EVM 上用于输入和输出连接的端子块位于分接插槽之外，从而不必进行功率密度评估。用于启用和禁用 X 电容器放电功能的跳线也位于插槽外部，因为它仅用于评估目的。

底部的大容量电容器 C2 两端连接了电阻器 R33、R34 和 R35。这样一来，如果交流整流输出未连接至负载，便可以在移除交流输入电源时快速提供高电压。实际设计中通常不使用这些电阻器，因此要从测量的输入功率中减去其功率损耗。

此设计中使用的主要器件是零电压开关反激式控制器 UCC28781-Q1 和 SR-FET 的隔离式驱动器 UCC5304。在为此 EVM 通电之前，请仔细阅读本用户指南。

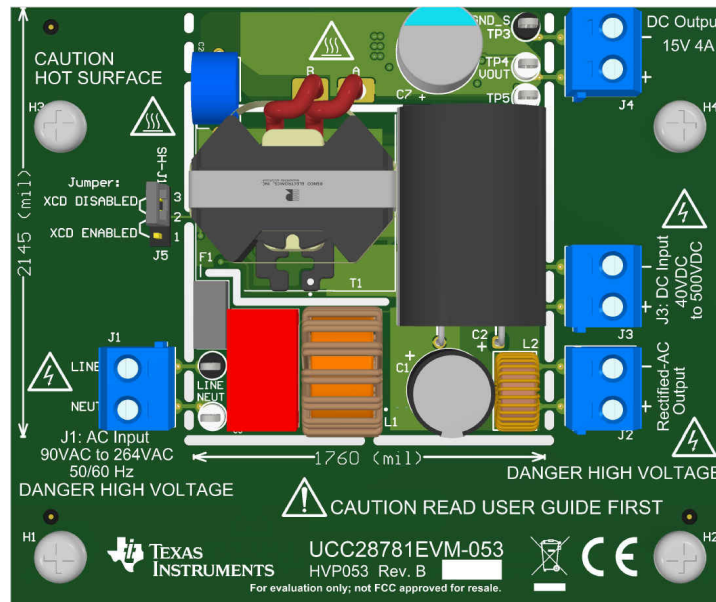


图 3-1. UCC28781EVM-053 顶视图

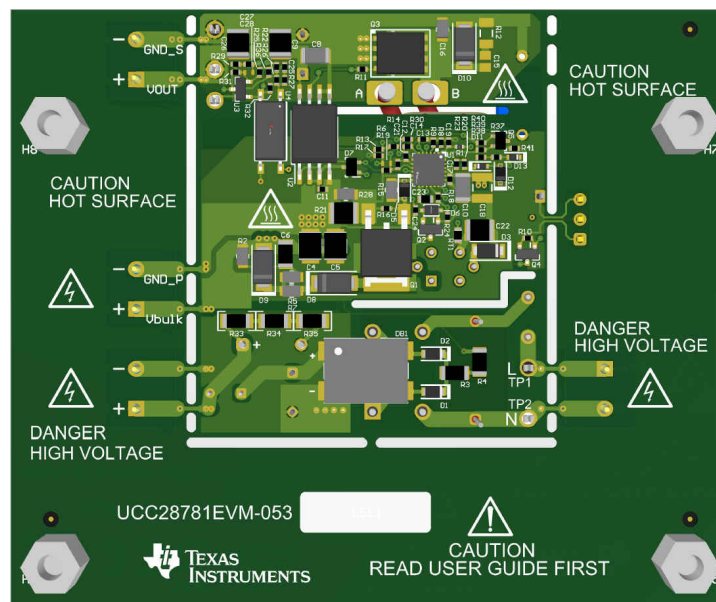


图 3-2. UCC28781EVM-053 底视图

4 EVM 的电气性能规格

表 4-1. 采用直流输入时的 EVM 性能⁽¹⁾ (初级开关 = Si MOSFET)

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
输入特性						
V_{IN}	输入线路电压 (直流)		50	400	500	V
P_{STBY} ⁽⁵⁾	无负载输入功率, $V_O = 15V$	$V_{IN} = 500V_{DC}, I_O = 0A$		47		mW
		$V_{IN} = 250V_{DC}, I_O = 0A$		36		mW
输出特性						
V_O	输出电压, 稳态	$V_{IN} = 250$ 至 $500V_{DC}, 0A \leq I_O \leq I_{O(FL_HI)}$	14.7	15	15.3	V
		$V_{IN} = 50$ 至 $250V_{DC}, 0A \leq I_O \leq I_{O(FL_LO)}$				
$I_{O(FL_HI)}$	满负载额定输出电流, 高输入范围	$V_{IN} = 250V$ 至 $500V_{DC}$			4	A
$I_{O(FL_LO)}$	满负载额定输出电流, 低输入范围	$V_{IN} = 50$ 至 $250V_{DC}$			2	A)
V_{O_PP}	输出纹波电压, 峰-峰值, 高输入范围	$V_{IN} = 250$ 至 $500V_{DC}, 0A \leq I_O \leq I_{O(FL_HI)}$		350	500	mVpp
	输出纹波电压, 峰-峰值, 低输入范围	$V_{IN} = 50$ 至 $250V_{DC}, 0A \leq I_O \leq I_{O(FL_LO)}$		200	300	
$P_{O(OPP)}$ ⁽⁴⁾	过功率保护阈值	$V_{IN} = 50$ 至 $500V_{DC}$			70	W
t_{OPP} ⁽⁴⁾	过功率保护持续时间	$V_{IN} = 50$ 至 $500V_{DC}, P_O > P_{O(OPP)}$		160		ms
ΔV_O	负载阶跃期间的输出电压瞬态偏差	100Hz 条件下 $0A$ 和 $I_{O(FL_HI)}$ 之间的 I_O 阶跃 $V_{IN} = 250$ 至 $500V_{DC}$	-1300		+700	mVpk
系统特点						
η_{FL}	满负载效率 ⁽²⁾	$V_{IN} = 500V_{DC}, I_O = I_{O(FL_HI)}$		0.932		
		$V_{IN} = 250V_{DC}, I_O = I_{O(FL_LO)}$		0.937		
η_{avg}	4 点平均效率 ^{(2) (3)}	$V_{IN} = 500V_{DC}, I_{O(FL_HI)}$ 范围		0.905		
		$V_{IN} = 250V_{DC}, I_{O(FL_LO)}$ 范围		0.919		
$\eta_{10\%}$	10% 负载下的效率 ⁽²⁾	$V_{IN} = 500V_{DC}, I_O = 10\% I_{O(FL_HI)}$		0.808		
		$V_{IN} = 250V_{DC}, I_O = 10\% I_{O(FL_LO)}$		0.835		
T_{AMB}	环境工作温度范围	$V_{IN} = 50$ 至 $500V_{DC}, I_O = 0$ 至 $I_{O(FL)}$		25		°C

- (1) 该表中列出的性能基于单个电路板分别采用直流输入或交流输入所产生的测试结果。
- (2) 运行至少 30 分钟后。效率结果中未考虑外部输入和输出电缆的功率损耗。
- (3) 四个负载点的平均效率： $I_O = 100\%$ 、 75% 、 50% 和 25% 的 $I_{O(FL)}$ 。
- (4) UCC28781A 中不提供 OPP 功能。
- (5) 输入待机功耗在禁用 XCD 功能的情况下测得。

表 4-2. 采用交流输入时的 EVM 性能⁽¹⁾ (主开关 = Si MOSFET)

参数	测试条件	最小值	标称值	最大值	单位		
输入特性							
V_{IN}	输入交流线路电压 (RMS)	90	115/230	264	V		
f_{LINE}	输入交流线路频率	47	50/60	63	Hz		
P_{STBY} ⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾	无负载输入功率, $V_O = 15V$	$V_{IN} = 230V_{RMS}, I_O = 0A$		42	mW		
		$V_{IN} = 115V_{RMS}, I_O = 0A$		36			
输出特性							
V_O	输出电压, 稳态	$V_{IN} = 180$ 至 $264V_{RMS}, 0A \leq I_O \leq I_{O(FL_HI)}$		14.7	15	15.3	V
		$V_{IN} = 90$ 至 $180V_{RMS}, 0A \leq I_O \leq I_{O(FL_LO)}$					
$I_{O(FL_HI)}$	满负载额定输出电流, 高输入范围	$V_{IN} = 180V$ 至 $264V_{RMS}$			4		A
$I_{O(FL_LO)}$	满负载额定输出电流, 低输入范围	$V_{IN} = 90V$ 至 $180V_{RMS}$			2		A)
$P_{O(OPP)}$ ⁽⁴⁾	过功率保护阈值	$V_{IN} = 90V$ 至 $264V_{RMS}$			70		W
t_{OPP} ⁽⁴⁾	过功率保护持续时间	$V_{IN} = 90V$ 至 $264V_{RMS}, P_O > P_{O(OPP)}$			160		ms
ΔV_O	负载阶跃期间的输出电压瞬态偏差	100Hz 条件下 $0A$ 和 $I_{O(FL_HI)}$ 之间的 I_O 阶跃 $V_{IN} = 180$ 至 $264V_{RMS}$		-1300		+700	mVpk
系统特性⁽⁶⁾							
η_{FL}	满负载效率 ⁽²⁾	$V_{IN} = 230V_{RMS}, I_O = I_{O(FL_HI)}$		0.9336			
		$V_{IN} = 115V_{RMS}, I_O = I_{O(FL_LO)}$		0.9271			
η_{avg}	4 点平均效率 ⁽²⁾ ⁽³⁾	$V_{IN} = 230V_{RMS}, I_{O(FL_HI)}$ 范围		0.9213			
		$V_{IN} = 115V_{RMS}, I_{O(FL_LO)}$ 范围		0.9150			
$\eta_{10\%}$	10% 负载下的效率 ⁽²⁾	$V_{IN} = 230V_{RMS}, I_O = 10\%$ 的 $I_{O(FL_HI)}$		0.8684			
		$V_{IN} = 115V_{RMS}, I_O = 10\%$ 的 $I_{O(FL_LO)}$		0.8480			
T_{AMB}	环境工作温度范围	$V_{IN} = 90V$ 至 $264V_{RMS}, I_O = 0A$ 至 $I_{O(FL)}$		25			°C

- (1) 该表中列出的性能基于单个电路板分别采用直流输入或交流输入所产生的测试结果。
(2) 运行至少 30 分钟后。效率结果中未考虑外部输入和输出电缆的功率损耗。
(3) 四个负载点的平均效率： $I_O = 100\%$ 、 75% 、 50% 和 25% 的 $I_{O(FL)}$ 。
(4) UCC28781A 中不提供 OPP 功能。
(5) 输入待机功耗在禁用 XCD 功能的情况下测得。
(6) 不包括大容量电容器 C2 上恒压电压泄放电阻器 R33、R34 和 R35 的功率损耗。

5 EVM 的原理图

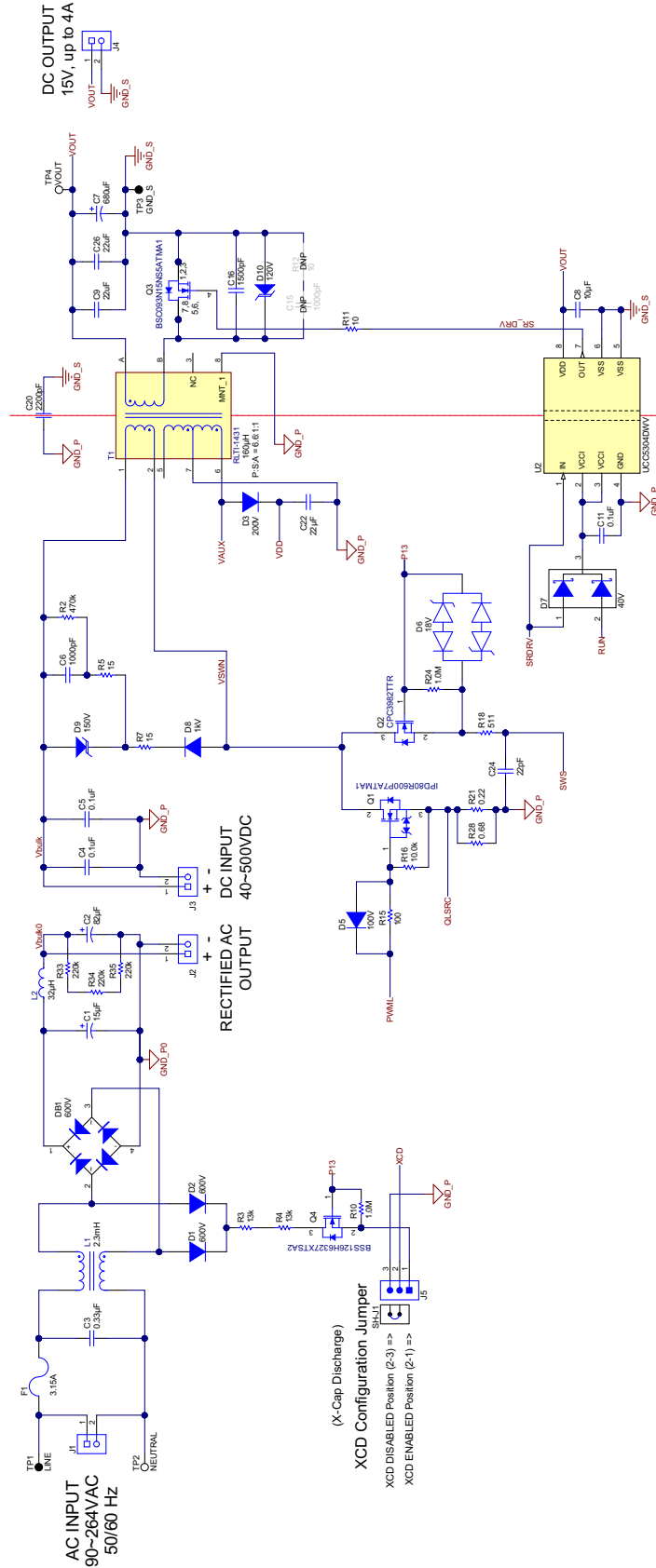


图 5-1. UCC28781EVM-053 原理图 (1/3) - 电源转换部分

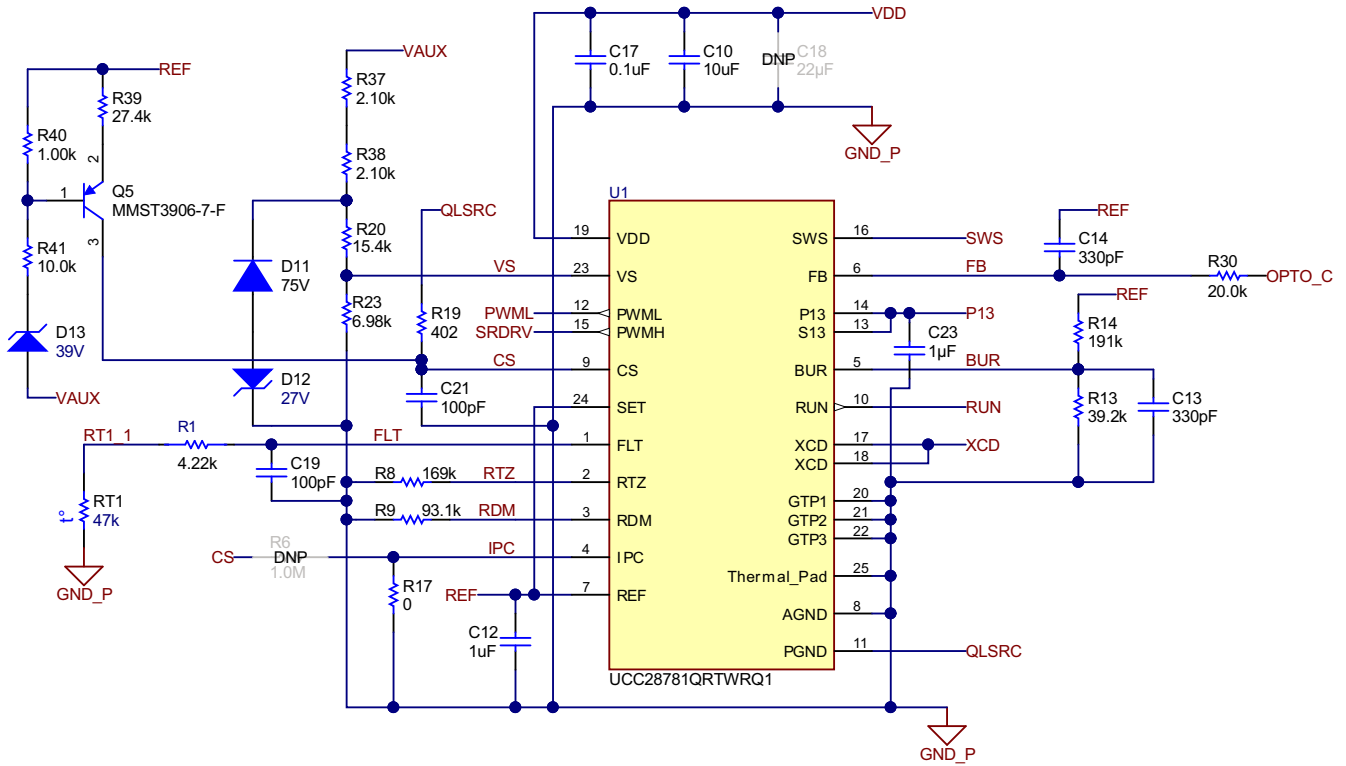


图 5-2. UCC28781EVM-053 原理图 (2/3) - 控制器部分

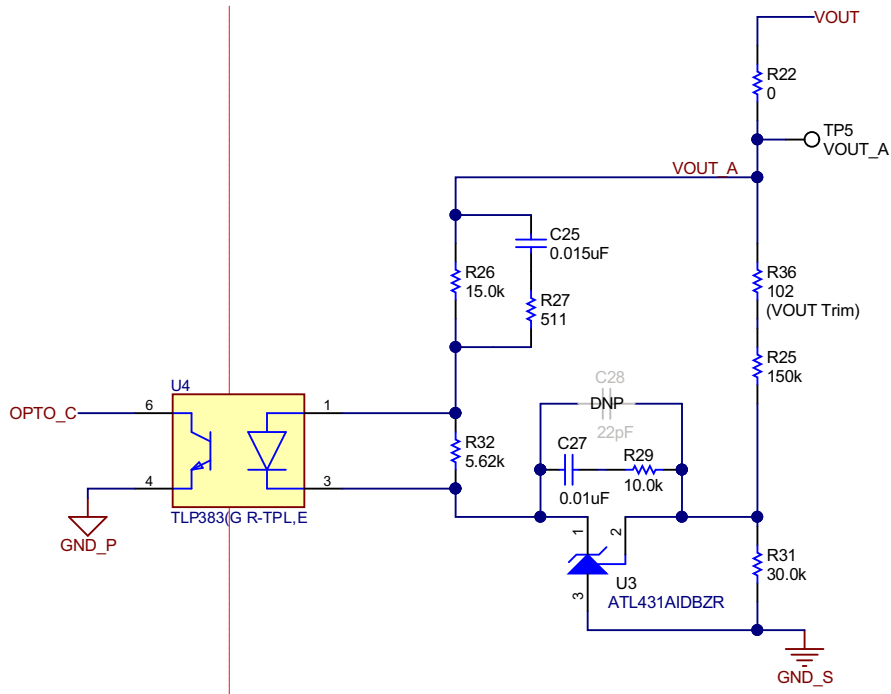


图 5-3. UCC28781EVM-053 原理图 (3/3) - 反馈部分

6 通过直流或交流电源运行 EVM

6.1 典型应用

- 高压汽车牵引逆变器偏置电源
- 高压汽车冗余电源
- 高密度交流/直流或直流/直流辅助电源

6.2 将 EVM 与直流电压源搭配使用

使用直流输入时，EVM 的交流部分应当保持完全未使用，并且没有任何器件连接到端子块 J1 和 J2。另外，应该在施加直流电源之前将 J5 处安装的 XCD 跳线置于“XCD Disabled”位置。

UCC28781EVM-053 可直接采用电压范围为 500V 至小于 50V 的隔离式高压直流电源供电。通常，输入电压必须大于 100V 才能启动，启动后可降至 50V 以下。当使用小于 250V 的输入电压启动时，输出电流应该限制在 2A 或以下。

将直流电源的电流限值设为 1A。对于 [250V 至 500V] 范围内的输入电压，可以获得满额定输出功率 (60W)。对于 50V 至 250V 范围内的输入电压，由于低输入电压条件下初级电流的高 RMS 级别，输出功率额定值会有所下降 (30W)。

隔离式直流电源应使用长度小于 1 米的低阻抗电缆（例如适当绝缘的 18AWG 双绞线）连接到 EVM 的 J3 (DC INPUT 端子块)。该 EVM 在直流输入端具有非常小的板载恒压电压旁路电容，因此可以在外部为 J3 添加额外的高压电容器来增大直流恒压电压，从而进行某些性能测试。

在轻负载条件下，直流输入电流包含突发模式频率的脉冲，数字万用表 (DMM) 无法正确取平均值并进行测量。若要在轻负载条件下准确地测量输入电流，应在直流输入端子块上连接一个高压 2 μ F 薄膜电容器。另外，应该按图 7-1 中所示在直流输入端上串联一个 10W、100 Ω 电阻器来构成一个 R-C 滤波器，从而使脉冲输入电流变得平滑。

该 EVM 的输出 (15V) 由端子块 J4 提供，该端子块应该连接到无源电阻负载或有源电子负载。有源负载通常能够在加荷方式和扰动方面提供出色的灵活性。

6.3 将 EVM 与交流电压源搭配使用

UCC28781EVM-053 还可以采用 264V_{RMS} 至 90V_{RMS} 且线路频率为 50Hz 至 60Hz 的隔离式高压交流电源供电。通常，输入电压必须大于 90V_{RMS} 才能启动，并且当输入电压小于 180V_{RMS} 时，输出电流应限制为 2A 或以下。

对于 180V_{RMS} 至 264V_{RMS} 范围内的输入电压，可以获得满额定输出功率 (60W)。对于 90V_{RMS} 至 180V_{RMS} 范围内的输入电压，由于低输入电压条件下初级电流的高 RMS 级别，输出功率额定值会有所下降 (30W)。

隔离式交流电源应该使用长度小于 1 米的低阻抗电缆（例如适当绝缘的 18AWG 双绞线）连接到 EVM 的 J1 (AC INPUT 端子块)。该 EVM 提供了传统的全波整流和滤波恒压电压部分，以便在采用交流线路供电时对 ZVSF 性能进行评估。交流部分的输出端通过使用较短的隔离式跳线将端子块 J2 跳接至端子块 J3 来连接直流输入端。请参阅图 7-2 中所示的连接方式。

使用交流线路输入时，可以通过在 J5 处安装 XCD 跳线并置于“XCD ENABLED”位置来评估 UCC28781-Q1 的 X 电容器放电 (XCD) 功能。请记住，只要不使用交流输入，就应将 XCD 跳线重新置于“XCD DISABLED”位置，以避免采用直流工作模式时使元件受损。在重新定位 XCD 跳线之前关闭所有输入电源。切勿在加电条件下更改 J5 位置。

该 EVM 的输出 (15V) 由端子块 J4 提供，该端子块应该连接到无源电阻负载或有源电子负载。有源负载通常能够在加荷方式和扰动方面提供出色的灵活性。

7 测试设置

7.1 测试设置要求

7.1.1 直流输入的测试设置要求

安全性：此评估模块并未进行封装，电路板中存在超过 50V_{DC} 的可接触电压。



WARNING

- 如果您没有接受过安全处理和测试功率电子产品方面的培训，请不要测试此评估模块。
- EVM 通电后，请勿触摸 EVM 或其电路，因为这些电路可能存在高压，会造成电击危险。
- 注意表面高温。接触会导致烫伤。请勿触摸！
- 在进行测试之前，请仔细阅读本用户指南。

电压源：能够处理 100W 功率级别的直插式隔离直流电源。将输出电流限值设为 1A。

输入隔离变压器：如果直流电源与交流线路没有内部安全隔离，直流电源输入端上应连接额定值适用的 1:1 隔离变压器，该变压器构造为通过增强型绝缘、双重绝缘或连接到保护导体端子的屏蔽将初级绕组与次级绕组隔离开来。

输出仪表：数字电压表、数字电流表

输入仪表：数字电压表、数字电流表

示波器：

- 4 通道、500MHz 带宽。
- 能够处理 600V 电压的探头。

输出负载：能够在 15V 条件下处理 100W 的电阻负载或电子负载。

建议线规：隔离式 18AWG。

按图 7-1 中所示设置直流输入的测试配置。



WARNING

注意：请勿在无人照看的情况下使 EVM 通电。

！！请勿将交流电压源施加到此电路板的直流输入端。这会损坏 EVM！（请参阅上方的电压源设置）

7.1.2 交流输入的测试设置要求

安全性：此评估模块并未进行封装，电路板中存在超过 50V_{DC} 的可接触电压。

输入隔离变压器：此 EVM 的交流输入端上应连接额定值适用的 1:1 隔离变压器，该变压器构造为通过增强型绝缘、双重绝缘或连接到保护导体端子的屏蔽将初级绕组与次级绕组隔离开来。



WARNING

- 如果您没有接受过安全处理和测试功率电子产品方面的培训，请不要测试此评估模块。
- EVM 通电后，请勿触摸 EVM 或其电路，因为这些电路可能存在高压，会造成电击危险。
- 注意表面高温。接触会导致烫伤。请勿触摸！
- 在进行测试之前，请仔细阅读本用户指南。

电压源：能够提供 264V_{RMS} 且能够处理 100W 功率级别的隔离式交流电源或可变交流变压器。**警告：**当 X 电容器放电功能处于启用状态时，请勿向此电路板施加直流电压，否则可能会造成损坏。如果必须在交流输入端 J1 处使用直流电压源，则必须在施加直流电源之前将 J5 处的 XCD 跳线设置为“XCD DISABLED”位置。在更改 XCD 跳线的位置之前，请断开 EVM 的所有电源。

输出仪表：数字电压表、数字电流表

输入功率分析仪：能够测量 10mW 至 100W 输入功率并能够处理 264V_{RMS} 输入电压。一些功率分析仪可能需要使用精密分流电阻器来测量输入电流，以便测量 5W 或更低的输入功率。请阅读功率分析仪的用户手册，以了解正确测量全功率和待机功率的设置。对于效率评估，请记住从输入功率测量中减去 R33、R34 和 R35 (C2 两端) 的功率损耗。

示波器：

- 4 通道、500MHz 带宽。
- 能够处理 600V 电压的探头。

输出负载：能够在 15V 条件下处理 100W 的电阻负载或电子负载。

建议线规：隔离式 18AWG。

按图 7-2 中所示设置交流输入的测试配置。



WARNING

注意：请勿在无人照看的情况下使 EVM 通电。

！！请勿向此电路板的交流输入端施加直流电压源，否则可能造成损坏！（请参阅上方的电压源设置）

7.2 测试设置图

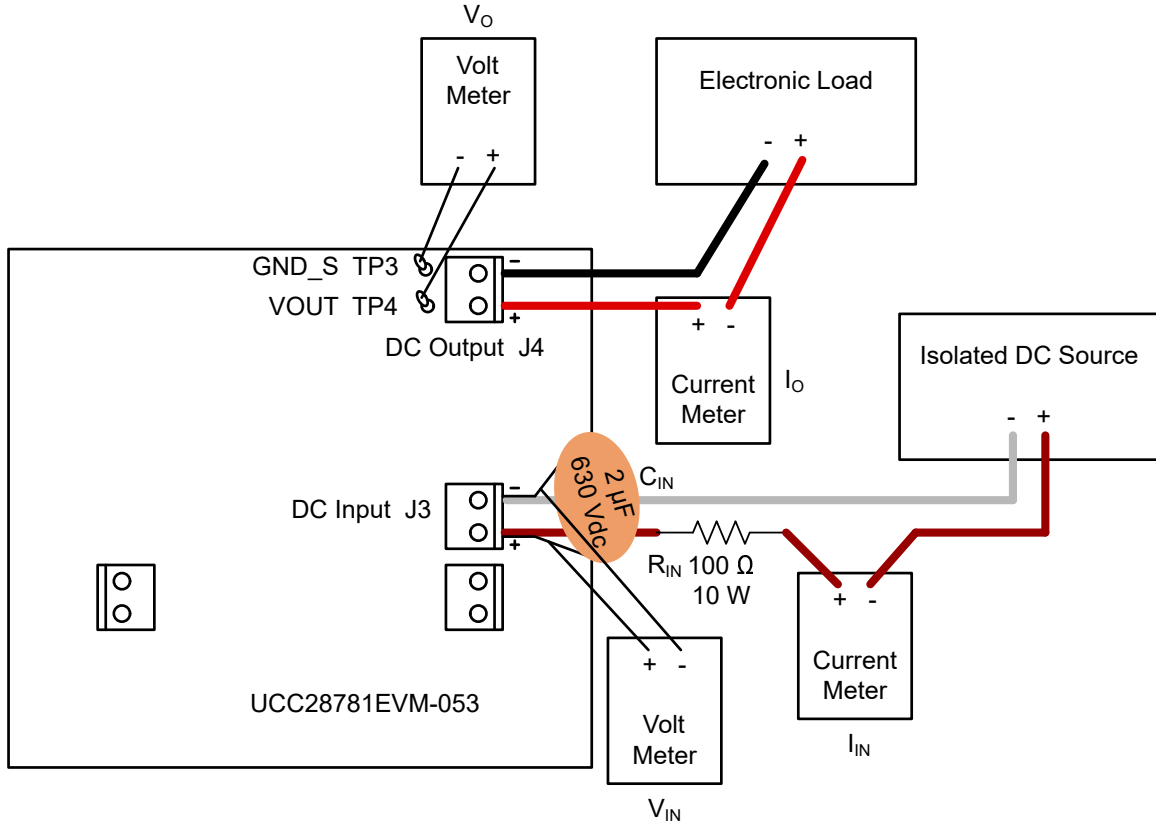


图 7-1. UCC28781EVM-053 直流输入测试设置图

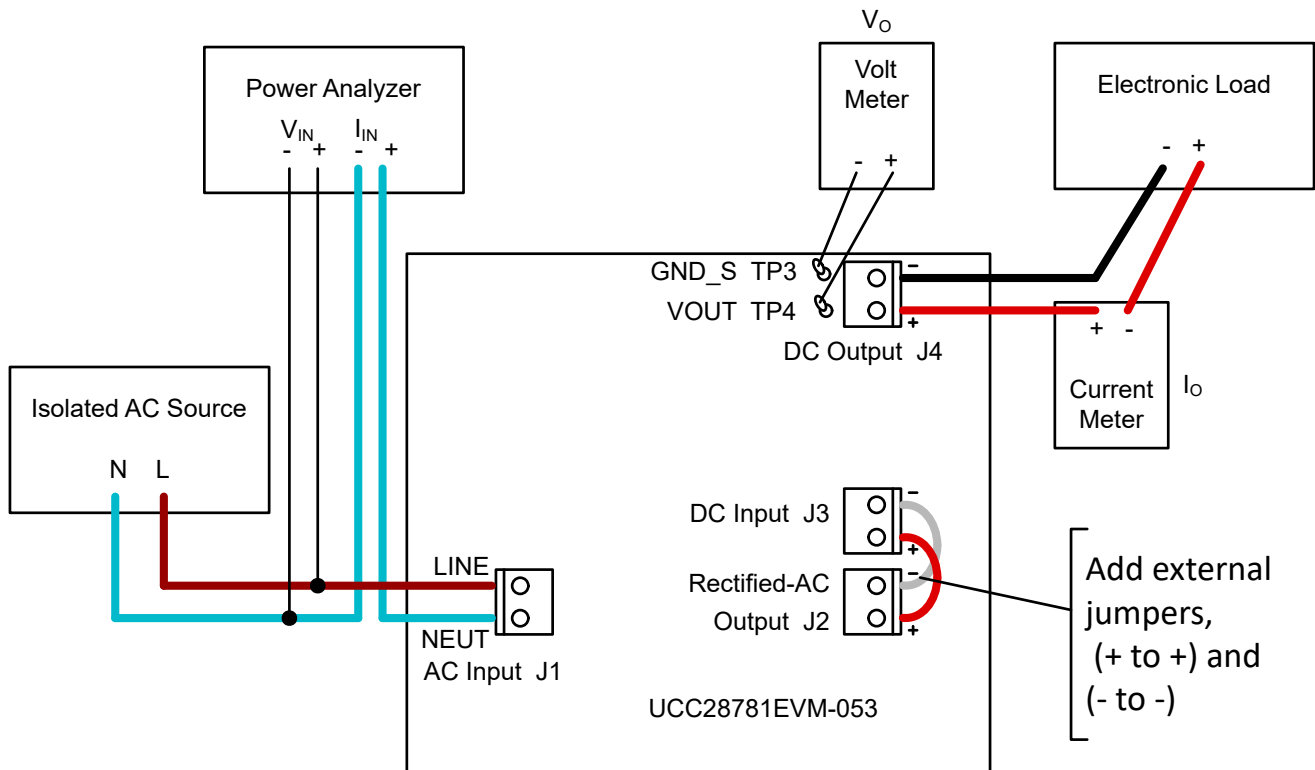


图 7-2. UCC28781EVM-053 交流输入测试设置图

7.3 端子和测试点

表 7-1. 输入/输出端子和测试点功能

端子和测试点		名称	说明
J1-1	端子块 J1	LINE	初级侧交流输入“火线”或线路 1。
J1-2		NEUT	初级侧交流输入“零线”或线路 2。
J2-1	端子块 J2	Vbulk0	从交流电源得到的初级侧整流和滤波正电压输出“Vbulk0” (+)。
J2-2		GND_P0	从交流电源得到的初级侧整流和滤波负电压输出“GND_P0” (-)。
J3-1	端子块 J3	Vbulk	从直流电源得到的初级侧正电压输入“Vbulk” (+)。
J3-2		GND_P	从直流电源得到的初级侧负电压输入“GND_P” (-)。
J4-1	端子块 J4	VOUT	次级侧直流电压输出“VOUT” (+) 正连接。
J4-2		GND_S	次级侧直流电压输出“GND_S” (-) 负连接。
J5-1	3 引脚接头 J5	AC-Sense	来自 X 电容器的初级侧感测和放电路径。
J5-2		XCD	与 UCC28781-Q1 控制器 XCD 引脚的初级侧连接。
J5-3		GND_P	初级侧接地基准，用于禁用 XCD 功能。
TP1	J1-1 附近的输入测试点	输入	初级侧交流输入监测点 - 火线 (或线路 1)。
TP2	J1-2 附近的输入测试点	NEUT	初级侧交流输入监测点 - 零线 (或线路 2)。
TP3	J4-2 附近的输出测试点	GND_S	次级侧直流输出检测“GND_S” (-) 接地基准。
TP4	J4-1 附近的输出测试点	VOUT	次级侧直流输出检测“VOUT” (+) 正基准。
TP5	J4-1 附近的输出测试点	VOUT_A	用于小信号环路稳定性分析的次级侧直流插入点“VOUT_A”。

8 性能数据和典型特性曲线

8.1 采用直流输入时的效率测量表

表 8-1. 采用直流输入时 15V 输出的效率测试数据

V_{IN} (V _{DC})	P_{IN} (W)	V_{OUT} (V)	I_{OUT} (A)	I_{OUT} (%)	效率 I_{OUT} 情况下	效率 4 点平均情况下	平均开关频率 满负载情况下
500 I_{FL_HI} 范围	63.990	14.090	4.001	100%	0.9322	0.9050	170kHz
	48.464	14.915	3.002	75%	0.9239		
	32.991	14.919	2.003	50%	0.9058		
	17.462	14.925	1.004	25%	0.8581		
	7.484	14.930	0.405	10%	0.8082		
375 I_{FL_HI} 范围	63.454	14.911	4.001	100%	0.9402	0.9234	165kHz
	47.820	14.917	3.003	75%	0.9368		
	32.377	14.921	2.003	50%	0.9231		
	16.762	14.928	1.003	25%	0.8936		
	6.999	14.933	0.405	10%	0.8634		
250 I_{FL_HI} 范围	63.01	14.910	4.002	100%	0.9470	0.9354	154kHz
	47.36	14.920	3.002	75%	0.9458		
	31.89	14.925	2.002	50%	0.9370		
	16.44	14.928	1.004	25%	0.9118		
	6.95	14.934	0.405	10%	0.8711		
250 I_{FL_LO} 范围	31.89	14.925	2.002	100%	0.9370	0.9185	221kHz
	24.11	14.928	1.500	75%	0.9287		
	16.44	14.928	1.004	50%	0.9118		
	8.34	14.938	0.501	25%	0.8965		
	3.65	14.940	0.204	10%	0.8354		
150 I_{FL_LO} 范围	31.62	14.927	2.002	100%	0.9452	0.9315	190kHz
	23.79	14.930	1.500	75%	0.9414		
	16.14	14.931	1.004	50%	0.9291		
	8.23	14.934	0.502	25%	0.9105		
	3.47	14.938	0.200	10%	0.8624		
50 I_{FL_LO} 范围	32.28	14.925	2.002	100%	0.9257	0.9271	86.2kHz
	23.94	14.930	1.500	75%	0.9357		
	15.98	14.933	1.004	50%	0.9384		
	8.25	14.935	0.502	25%	0.9085		
	3.51	14.939	0.204	10%	0.8685		
仅供参考：CoC 2 级，4 点平均效率 ≥ 0.890 ，15V、60W (在 230V _{RMS} 条件下)							
仅供参考：CoC 2 级，10% 负载效率 ≥ 0.790 ，15V、60W (在 230V _{RMS} 条件下)							

8.2 采用交流输入时的效率测量表

表 8-2. 采用交流输入时 15V 输出的效率测试数据

V_{IN} (V _{RMS})	P_{IN} (W)	V_{OUT} (V)	I_{OUT} (A)	I_{OUT} (%)	效率 I_{OUT} 情况下	效率 4 点平均情况下	平均开关频率 满负载情况下
265 I_{FL_HI} 范围	64.24	14.914	4.001	100%	0.9319	0.9150	164kHz
	48.46	19.919	3.002	75%	0.9282		
	32.86	14.922	2.002	50%	0.9150		
	17.13	14.020	1.003	25%	0.8849		
	7.31	14.934	0.404	10%	0.8501		
230 I_{FL_HI} 范围	64.06	14.911	4.001	100%	0.9336	0.9213	161kHz
	48.23	14.918	3.002	75%	0.9316		
	32.59	14.923	2.002	50%	0.9212		
	16.83	14.934	1.003	25%	0.8987		
	7.12	14.934	0.405	10%	0.8684		
180 I_{FL_HI} 范围	64.13	14.909	4.003	100%	0.9320	0.9249	152kHz
	48.15	14.918	3.005	75%	0.9329		
	32.44	14.925	2.006	50%	0.9257		
	16.53	14.931	1.000	25%	0.9090		
	7.12	14.933	0.404	10%	0.8599		
180 I_{FL_LO} 范围	32.44	14.925	2.006	100%	0.9257	0.9096	217kHz
	24.51	14.929	1.501	75%	0.9181		
	16.53	14.931	1.000	50%	0.9090		
	8.60	14.933	0.505	25%	0.8858		
	3.88	14.936	0.208	10%	0.8227		
115 I_{FL_LO} 范围	32.27	14.926	2.002	100%	0.9271	0.9150	198kHz
	24.20	14.931	1.501	75%	0.9241		
	16.43	14.932	1.003	50%	0.9135		
	8.42	14.936	0.502	25%	0.8953		
	3.63	14.938	0.204	10%	0.8480		
90 I_{FL_LO} 范围	32.48	14.927	2.003	100%	0.9212	0.9121	162kHz
	24.34	14.929	1.501	75%	0.9218		
	16.50	14.932	1.005	50%	0.9105		
	8.41	14.935	0.503	25%	0.8949		
	3.63	14.939	0.205	10%	0.8518		
供参考：CoC 2 级，4 点平均效率 ≥ 0.890 ，15V、60W (在 230V _{RMS} 条件下)							
供参考：CoC 2 级，10% 负载效率 ≥ 0.790 ，15V、60W (在 230V _{RMS} 条件下)							

8.3 采用直流输入电压时的效率图 (典型结果)

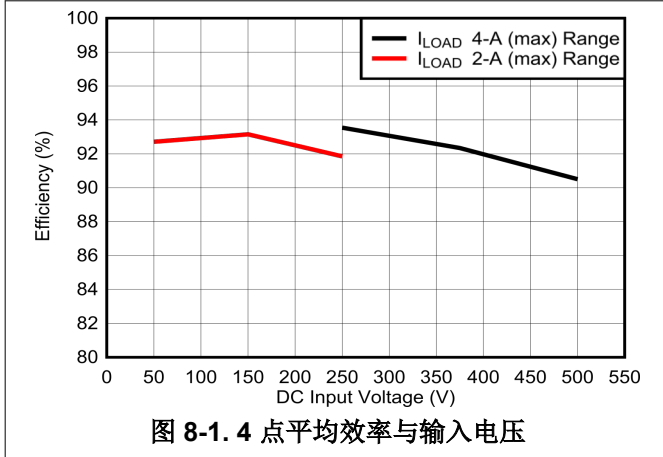


图 8-1. 4 点平均效率与输入电压

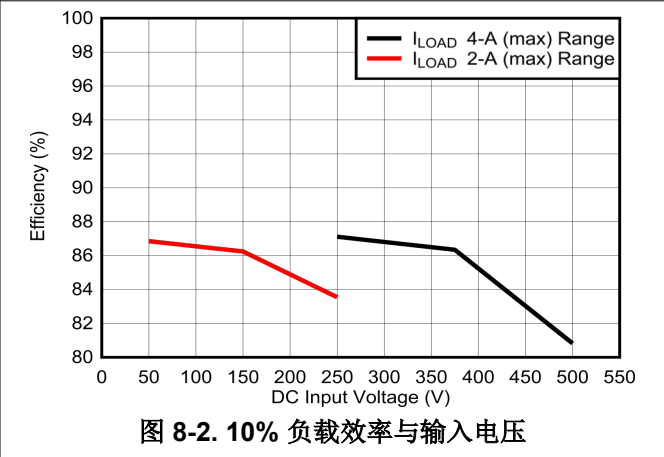


图 8-2. 10% 负载效率与输入电压

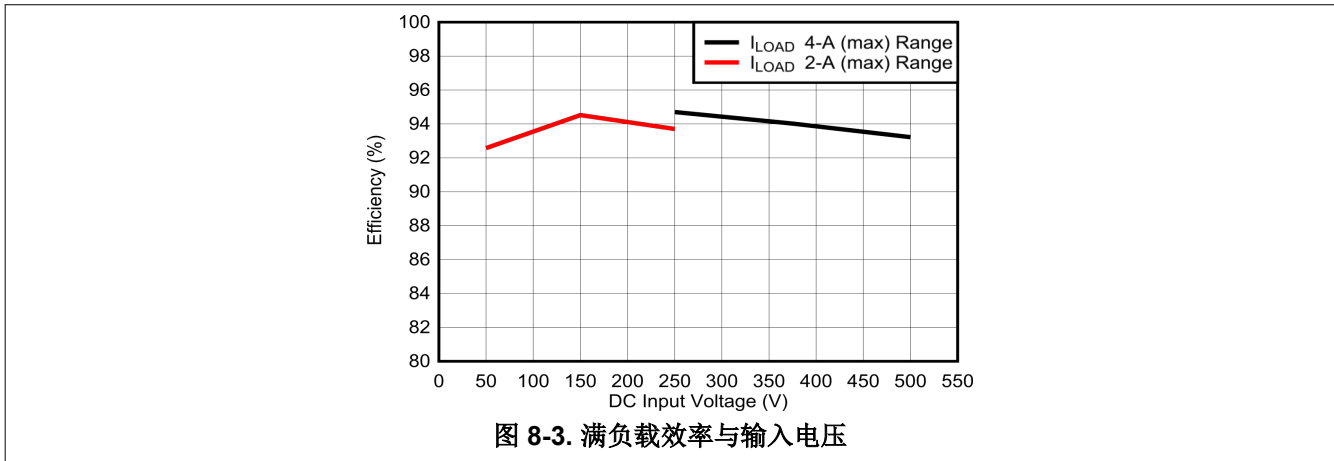


图 8-3. 满负载效率与输入电压

8.4 各种工作模式下的开关频率

在以下 AAM、ABM 和 SBP2 波形中，Ch4 (绿色) = 1A/div 条件下的变压器初级绕组电流，Ch2 (蓝色) = 10V/div、20V/div 和 50V/div (全部交流耦合) 条件下 SR-Mosfet 的 V_{DS} 。扫描速度分别为 10 μ s/div、10 μ s/div 和 1 μ s/div。

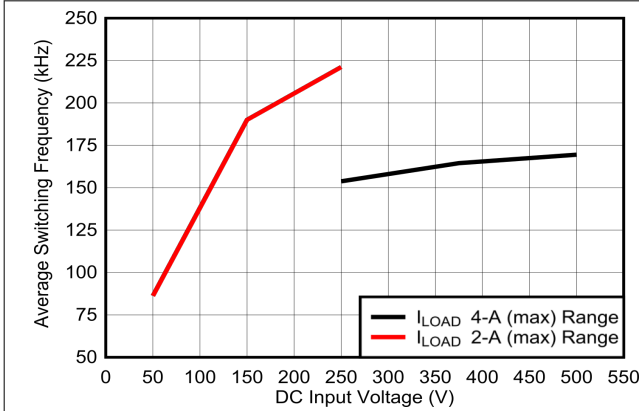


图 8-4. 满负载条件下的平均开关频率与直流输入电压

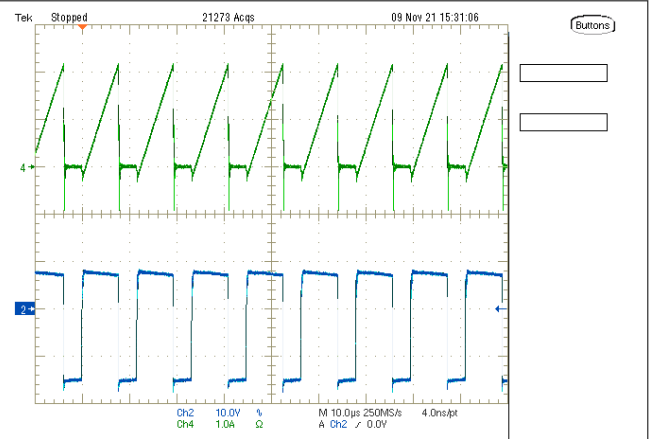


图 8-5. AAM = 86.2kHz、50V_{DC} 输入和 100% 负载情况下的最小开关频率

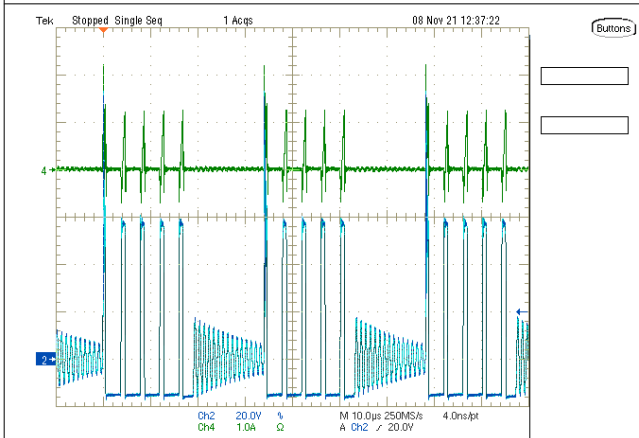


图 8-6. ABM = 261.8kHz、375V_{DC} 输入和 25% 负载情况下的最大开关频率

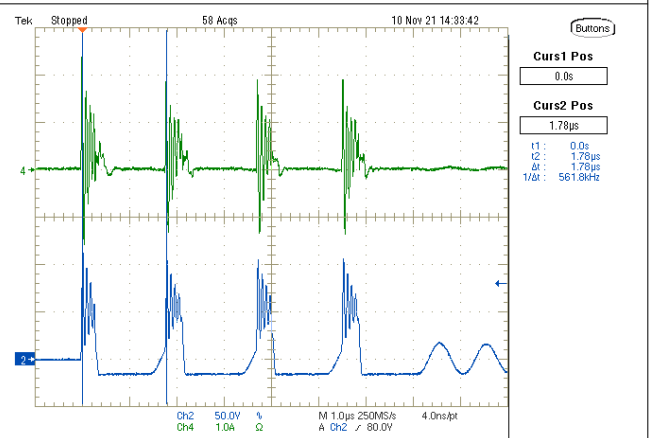


图 8-7. SBP2 = 561.8kHz、264V_{AC} 输入和 1% 负载情况下的最大开关频率

8.5 主要开关波形和工作模式负载电流

本节以表格形式展示了此设计中各种工作模式下的典型负载电流范围，其中以 $V_{in} = 250V_{DC}$ 且 I_{FL_HI} 范围为例。表 8-3 之后显示了表格中所示各个工作模式下的典型波形。与负载增加时相比，当负载减小时，模式间的迟滞会导致不同模式的电流范围存在差异。

- AAM：自适应幅度调制
- ABM：自适应突发模式
- LPM：低功率模式
- SBP1：第一待机功耗模式
- SBP2：第二待机功耗模式

表 8-3. I_{FL_HI} 范围内 250V_{DC} 输入/输出条件下的工作模式与负载电流

模式：	AAM	ABM	LPM	SBP1	SBP2
典型负载电流 (减少)	4.0 A 至 1.3 A	1.3 A 至 0.41 A	0.41 A 至 0.22 A	0.22 A 至 0.09 A	0.09 A 至 0 A
典型负载电流 (增加)	1.8 A 至 4.0 A	0.53 A 至 1.8 A	0.23 A 至 0.53 A	0.14 A 至 0.23 A	0 A 至 0.14 A

表 8-3. I_{FL_HI} 范围内 250V_{DC} 输入/输出条件下的工作模式与负载电流 (continued)

模式：	AAM	ABM	LPM	SBP1	SBP2
突发频率, f_{BUR} (每次突发的脉冲数)	不适用	> 25kHz (9 至 2 个脉冲)	约 25kHz (2 个脉冲)	8.5kHz 至 25kHz (2 个脉冲)	< 8.5kHz (2 个脉冲)

在以下波形中, Ch4 (绿色) = 1A/div 条件下的变压器初级绕组电流, Ch2 (蓝色) = SR-Mosfet 在 20V/div (交流耦合) 条件下的 V_{DS} 。

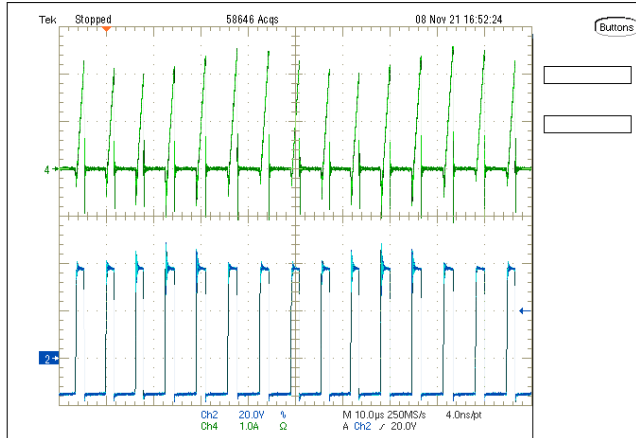


图 8-8. AAM 工作模式下的典型波形 (扫描 = 10 μs/div)

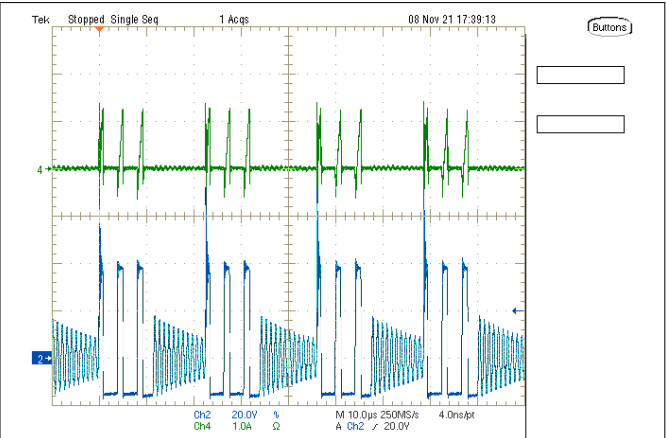


图 8-9. ABM 工作模式下的典型波形 (扫描 = 10 μs/div)

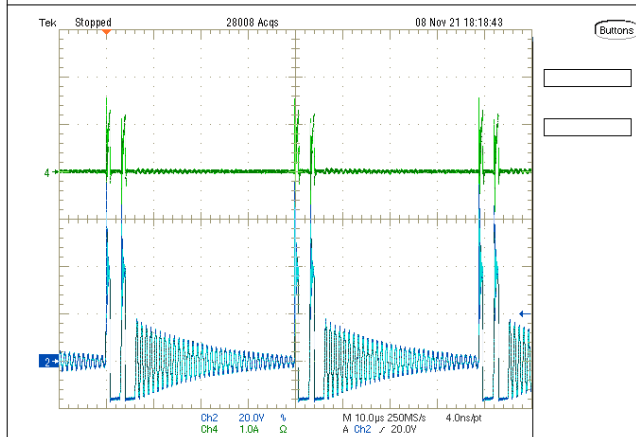


图 8-10. LPM 工作模式下的典型波形 (扫描 = 10 μs/div)

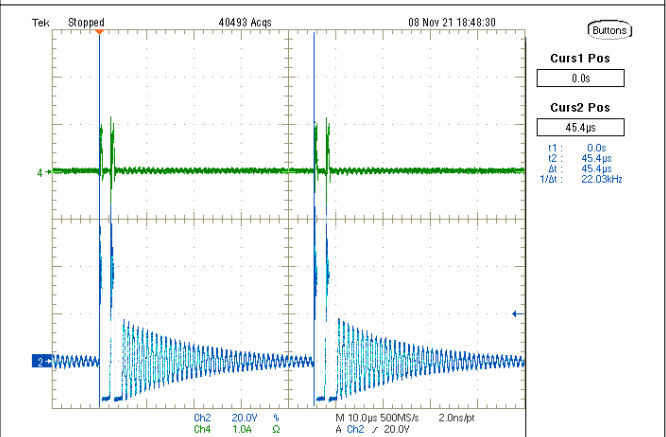
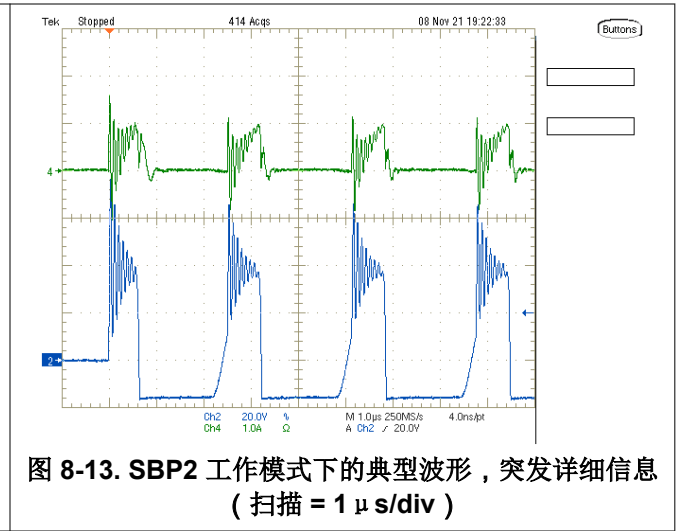
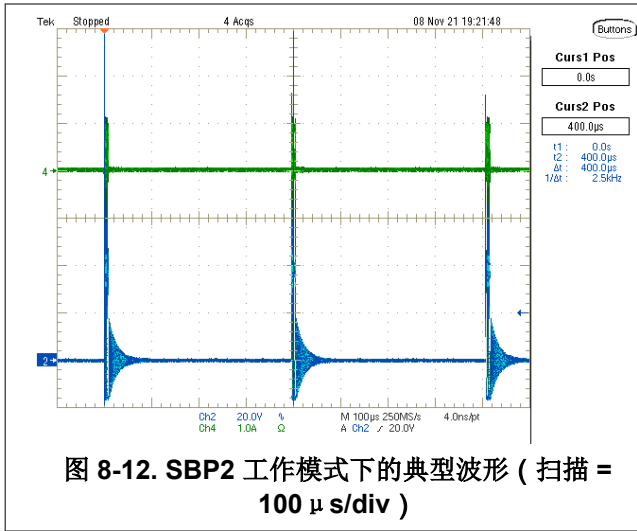
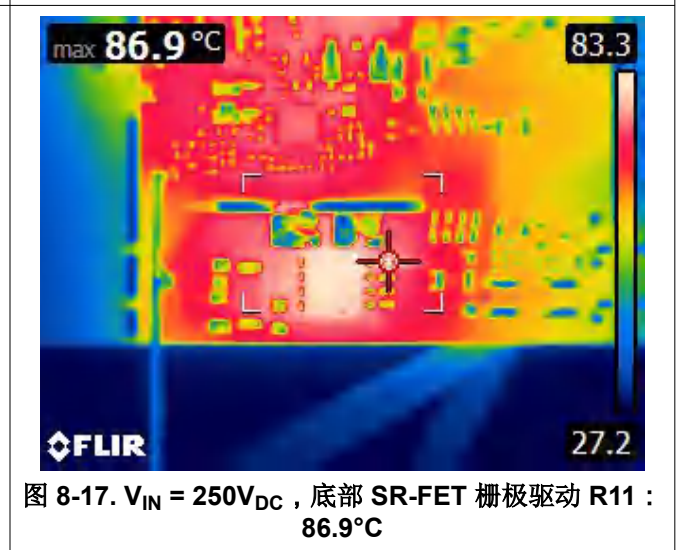
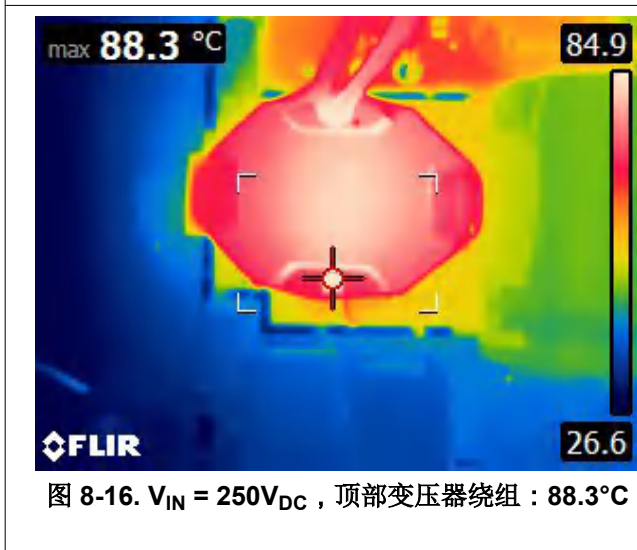
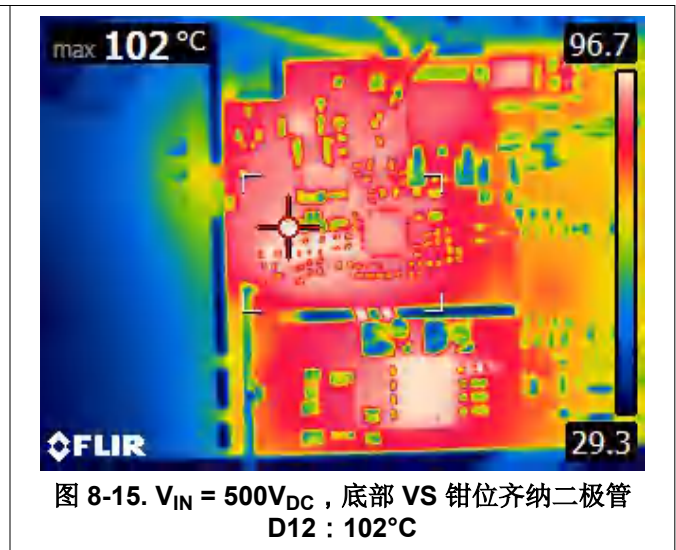
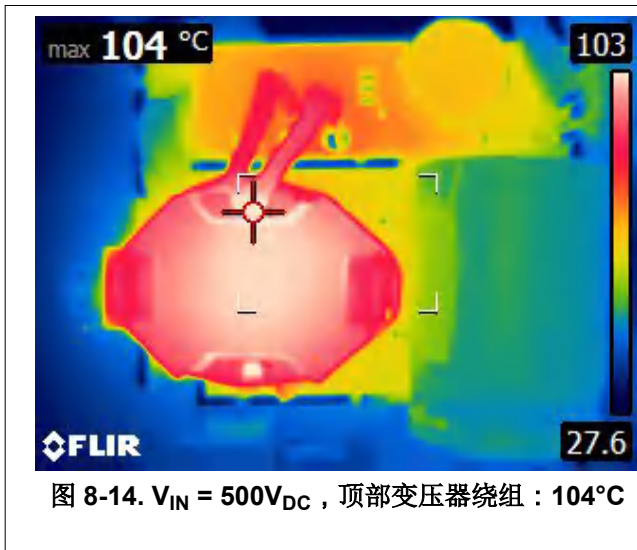


图 8-11. SBP1 工作模式下的典型波形 (扫描 = 10 μs/div)



8.6 直流和交流输入条件下满载时的热像图 (15V, 4.0A)



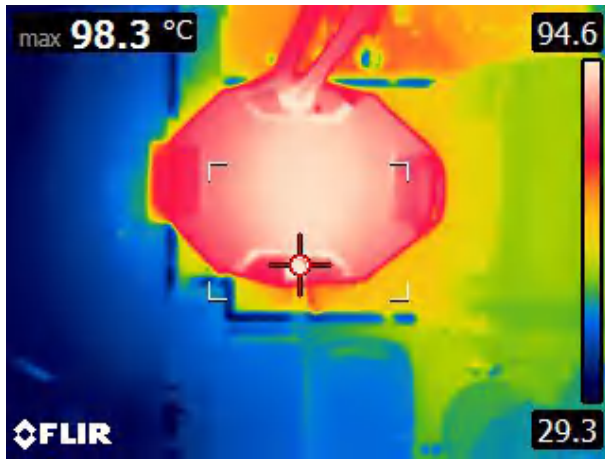


图 8-18. $V_{IN} = 264V_{AC}$ ，顶部变压器绕组：98.3°C

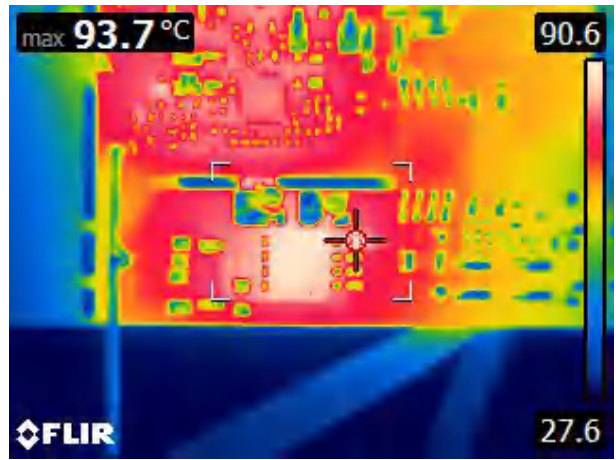


图 8-19. $V_{IN} = 264V_{AC}$ ，底部 SR-FET 栅极驱动 R11：93.7°C

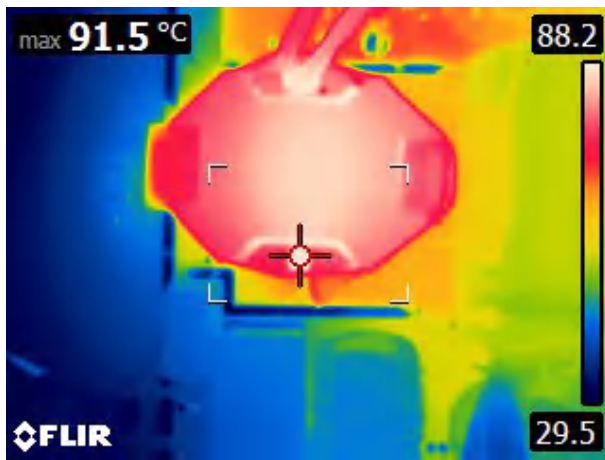


图 8-20. $V_{IN} = 180V_{AC}$ ，顶部变压器绕组：91.5°C

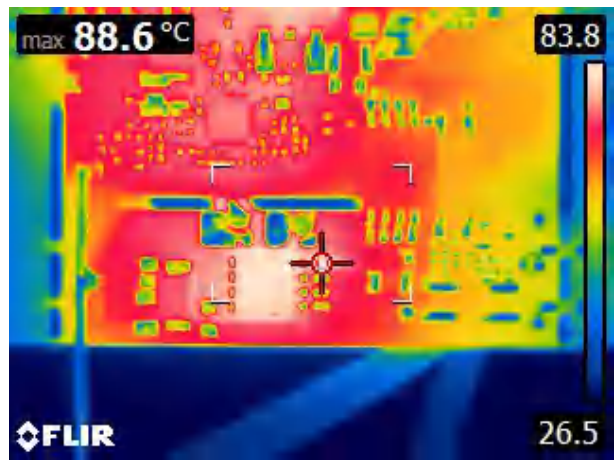


图 8-21. $V_{IN} = 180V_{AC}$ ，底部 SR-FET 栅极驱动 R11：88.6°C

9 变压器详细信息

此设计中使用的变压器 (器件型号 RLTI-1431) 采用 RM8 核芯组 , 由 Renco Electronics, Inc. 为此 EVM 定制设计。

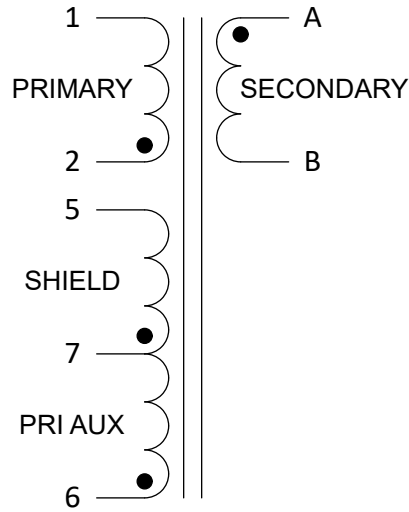


图 9-1. 变压器原理图

表 9-1. 25°C 时的变压器规格

参数	值	引脚/引线	测试条件
磁化电感 (μH)	160±5%	2 - 1	所有其他引脚均为开路, 150kHz, 0.1V
漏电感 (μH)	3.5 (最大值)	2 - 1	短接 A - B, 150kHz, 0.1V
直流电阻 (Ω)	0.24±15%	2 - 1	
直流电阻 (Ω)	0.007 (最大值)	A - B	
直流电阻 (Ω)	0.36±15%	6 - 7	
直流电阻 (Ω)	3.5±15%	7 - 5	
电介质 (VAC, 60Hz)	3000	1、6 - A	1s, 1mA (最大值)
匝数比	1 : 0.151 : 0.151	(2-1):(A-B):(6-7)	1.0V (10kHz 至 2 - 1)

10 EVM 装配图和布局

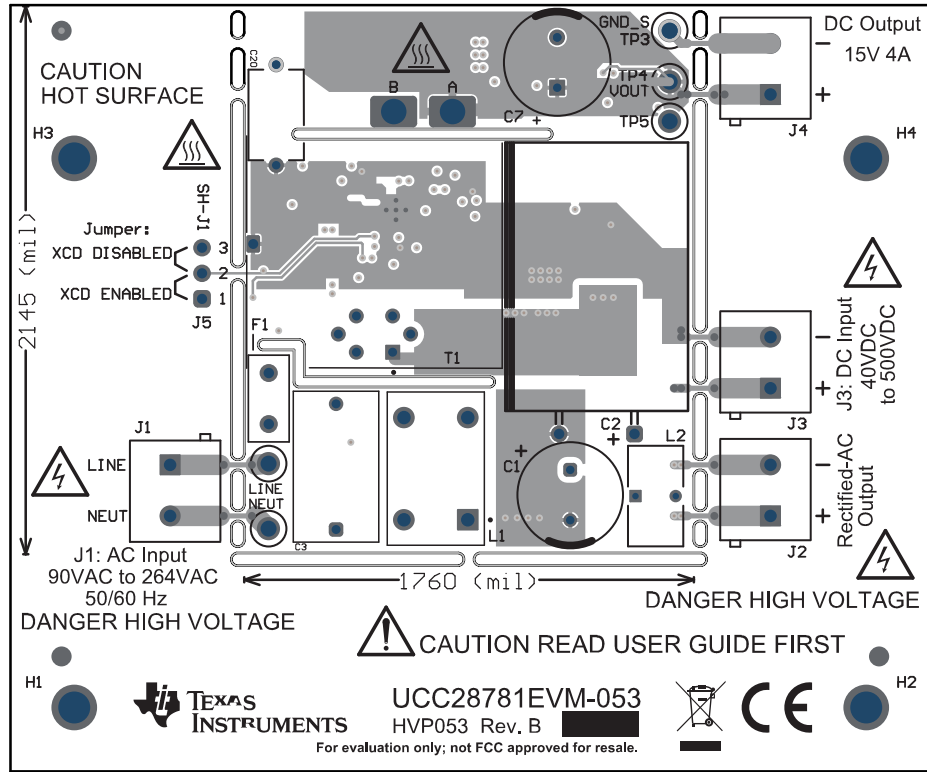


图 10-1. EVM 装配图 (顶视图)

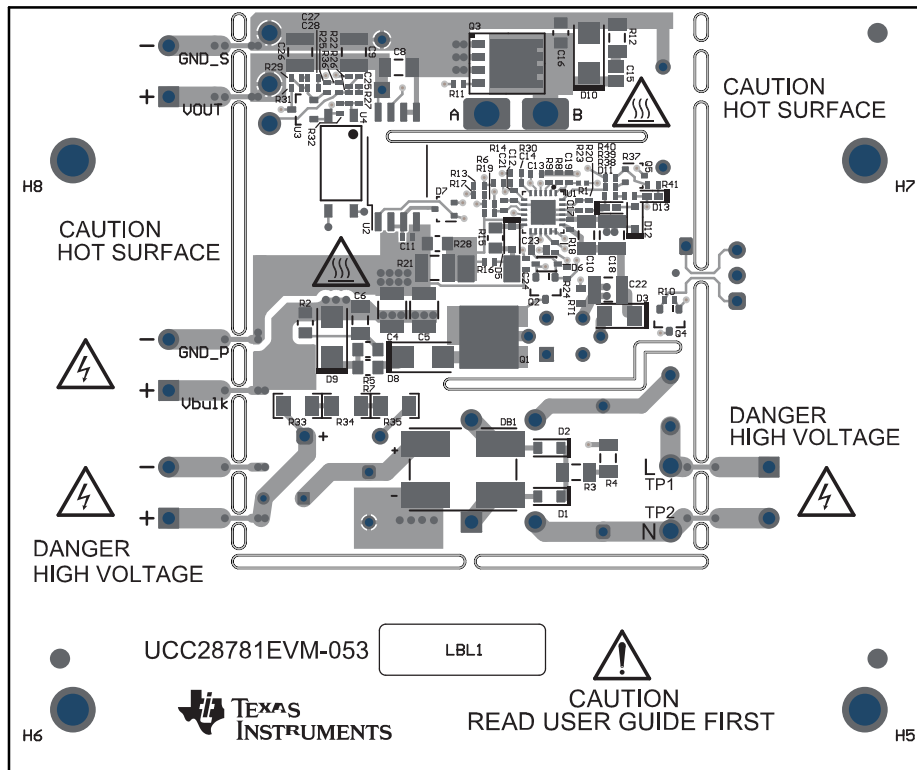


图 10-2. EVM 装配图 (底视图)

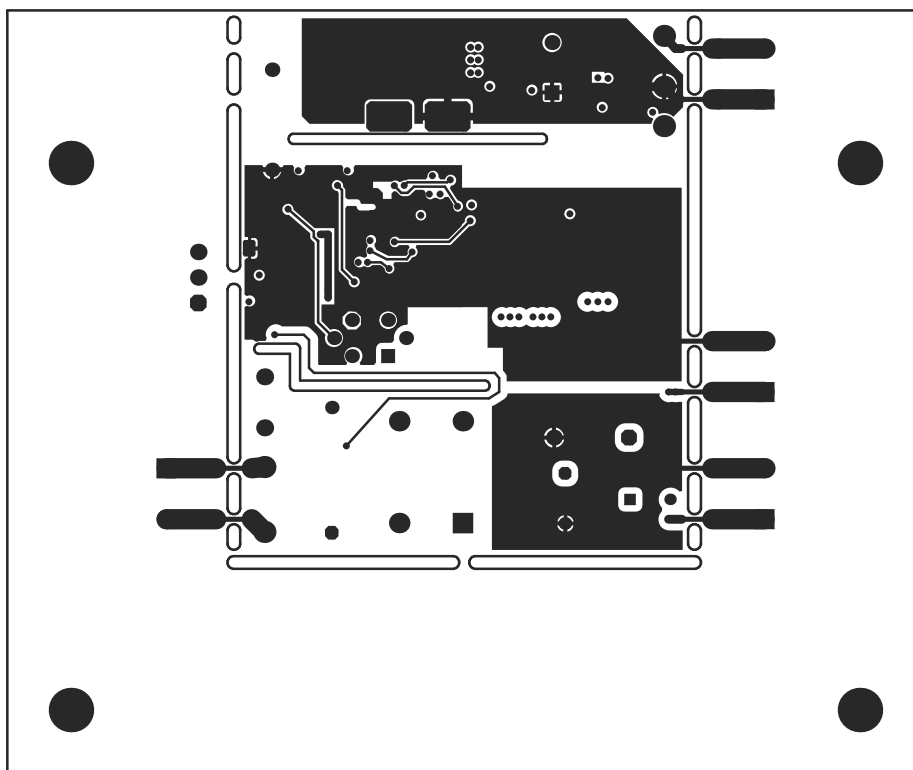


图 10-3. EVM 内部信号层 1 (顶视图)

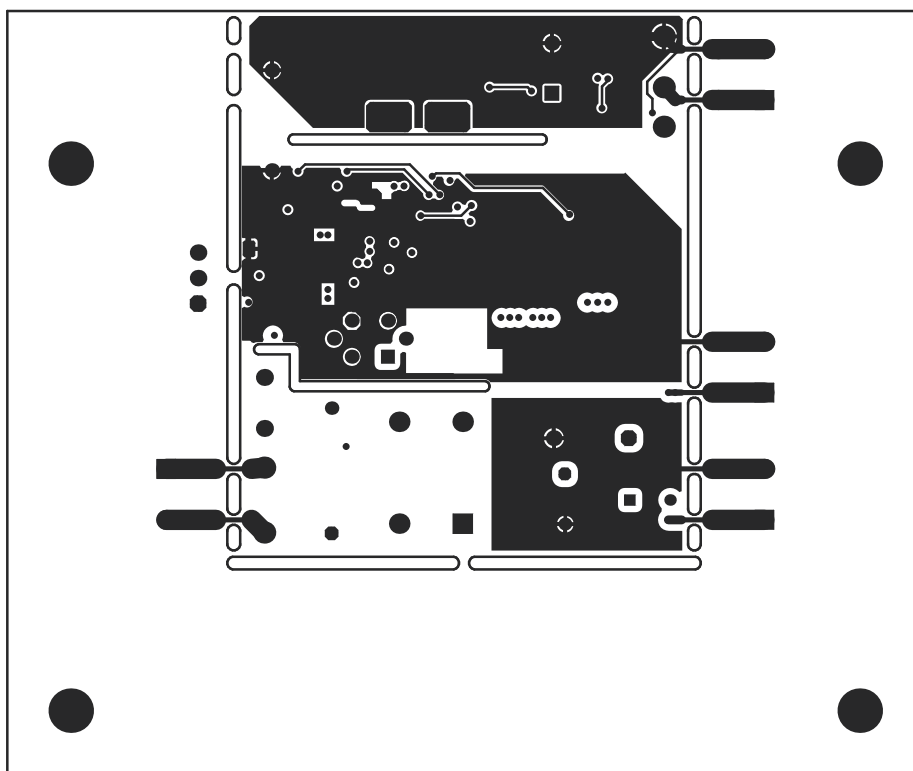


图 10-4. EVM 内部信号层 2 (顶视图)

11 物料清单

节 5 显示了原理图对应的 UCC28781EVM-053 物料清单。

表 11-1. UCC28781EVM-053 物料清单

标识符	数量	说明	器件型号	制造商
C1	1	电容, 铝制, 15 μ F, 400V, +/-20%, AEC-Q200 2 级, TH	UVC2G150MPD	Nichicon
C2	1	电容, 铝制, 82 μ F, 400V, +/-20%, TH	400BXW82MEFR18X25	Rubycon
C3	1	电容, 薄膜, 0.33 μ F, X2 275 VAC, +/-10%, TH	890324024003	Wurth Elektronik
C4, C5	2	电容, 陶瓷, 0.1 μ F, 630V, +/-10%, X7R, 1210	C1210C104KBRAC7800	Kemet
C6	1	电容, 陶瓷, 1000pF, 630V, +/-10%, X7R, 1206	GRM31BR72J102KW01L	MuRata
C7	1	电容, 铝聚合物, 680 μ F, 20V, +/-20%, 0.012 Ω , TH	APSG200ELL681MJB5S	Chemi-Con
C8	1	电容, 陶瓷, 10 μ F, 25V, +/-5%, X7R, AEC-Q200 1 级, 1206	C1206C106J3RACAUTO	Kemet
C9, C26	2	CAP、CERM、22uF、25V、+/-10%、X7R、1210	GRM32ER71E226KE15L	MuRata
C10	1	电容, 陶瓷, 10 μ F, 50V, +/-10%, X5R, 1206	C3216X5R1H106K160AB	TDK
C11, C17	2	电容, 陶瓷, 0.1 μ F, 50V, +/-20%, X7R, 0402	GRM155R71H104ME14D	MuRata
C12	1	电容, 陶瓷, 1 μ F, 16V, +/-10%, X6S, 0402	C1005X6S1C105K050BC	TDK
C13, C14	2	电容, 陶瓷, 330pF, 50V, +/-10%, X7R, 0402	GRM155R71H331KA01D	MuRata
C15	0	未使用, 0805	GRM21AR72E102KW01D	MuRata
C16	1	电容, 陶瓷, 1500pF, 250V, +/-10%, X7R, 0805	GRM21AR72E152KW01D	MuRata
C18	0	未使用, 1210	GMK325BJ226MM-P	Taiyo Yuden
C19, C21	2	电容, 陶瓷, 100pF, 50V, +/-5%, C0G/NP0, 0402	GRM1555C1H101JA01D	MuRata
C20	1	电容, 陶瓷, 2200pF, X1 400 VAC/Y1 400 VAC, +/-20%, Y5V, D9xL13mm	C921U222MVDDBA7317	Kemet
C22	1	电容, 陶瓷, 22 μ F, 35V, +/-20%, X5R, 1210	GMK325BJ226MM-P	Taiyo Yuden
C23	1	电容, 陶瓷, 1uF, 35V, +/-10%, X7R, AEC-Q200 1 级, 0603	CGA3E1X7R1V105K080AC	TDK
C24	1	电容, 陶瓷, 22pF, 50V, +/-5%, C0G/NP0, AEC-Q200 1 级, 0402	GCM1555C1H220JA16D	MuRata
C25	1	电容, 陶瓷, 0.015 μ F, 50V, +/-10%, X7R, 0402	GRM155R71H153KA12D	MuRata
C27	1	电容, 陶瓷, 0.01uF, 50V, +/-10%, X7R, 0402	GRM155R71H103KA88D	MuRata
C28	0	未使用, 0402	GCM1555C1H220JA16D	MuRata
D1, D2	2	二极管, 标准恢复整流器, 600V, 0.2A, 2x1.4mm	RFU02VSM6STR	Rohm
D3	1	二极管, 超快速整流器, 200V, 1A, 3.5x1.6mm	CSFMT104-HF	Comchip Technology
D5	1	二极管, 超快速, 100V, 0.25A, SOD-323	BAS316, 115	Nexperia
D6	1	二极管, TVS, 双向, 18V, SOD-323	CDSOD323-T18C	Bourns Inc.
D7	1	二极管, 肖特基, 40V, 0.2A, SOT-323	BAS40W-05-7-F	Diodes Inc.
D8	1	二极管, 标准恢复整流器, 1000V, 1A, AEC-Q101, SMA	MRA4007T3G	ON Semiconductor
D9	1	二极管, TVS, 单向, 150V, 243Vc, 400W, 1.6A, SMA	SMAJ150A	Littelfuse
D10	1	二极管, TVS, 单向, 120V, 193Vc, 400W, 2.1A, SMA	SMAJ120A	Littelfuse
D11	1	二极管, 开关, 75V, 0.3A, SOD-523	1N4148X-TP	Micro Commercial Components
D12	1	二极管, 齐纳, 27V, 300mW, AEC-Q101, SOD-323	SZMM3Z27VST1G	ON Semiconductor
D13	1	二极管, 齐纳, 39V, 350mW, AEC-Q101, SOD-523	BZT585B39T-7	Diodes Inc.
DB1	1	二极管, P-N-桥, 600V, 4A, Z4-D	Z4DGP406L-HF	Comchip Technology

表 11-1. UCC28781EVM-053 物料清单 (continued)

标识符	数量	说明	器件型号	制造商
F1	1	保险丝, 3.15A, 250VAC/VDC, TH	39213150000	Littelfuse
H1、H2、H3、H4	4	机械螺钉, 圆头, #4-40 x 1/4, 尼龙, 飞利浦盘形头	NY PMS 440 0025 PH	B&F Fastener Supply
H5、H6、H7、H8	4	六角螺柱, 0.5"L #4-40, 尼龙	1902C	Keystone Electronics
J1、J2、J3、J4	4	端子块, 5.08mm, 2x1, 黄铜, TH	ED120/2DS	On-Shore Technology
J5	1	接头, 100mil, 3x1, 金, TH	TSW-103-07-G-S	Samtec
L1	1	共模扼流圈, 2.3mH 35%, 0.6x0.38x0.75IN	RLTI-1387	Renco
L2	1	WE-FI 引线式环形线路扼流	7447052	Würth Elektronik
Q1	1	MOSFET, N 沟道, 800V, 8A, DPAK	IPD80R600P7ATMA1	Infineon Technologies
Q2	1	MOSFET, N 沟道, 耗尽模式, 800V, SOT-23	CPC3982TTR	IXYS
Q3	1	MOSFET, N 沟道, 150V, 87A, PG-TDSON-8	BSC093N15NS5ATMA1	Infineon Technologies
Q4	1	MOSFET, N 沟道, 耗尽模式, 100V, 0.17A, AEC-Q101, SOT-23	BSS126H6327XTSA2	Infineon Technologies
Q5	1	晶体管, PNP, 40V, 0.2A, AEC-Q101, SOT-323	MMST3906-7-F	Diodes Inc.
R1	1	电阻厚膜, 4.22k Ω , 1%, 0.063W, 100ppm/ $^{\circ}$ C, 0402	CRCW04024K22FKED	Vishay
R2	1	电阻, 470k, 5%, 0.125W, AEC-Q200 0 级, 0805	CRCW0805470KJNEA	Vishay-Dale
R3, R4	2	电阻, 13k, 5%, 0.25W, AEC-Q200 0 级, 1206	CRCW120613K0JNEA	Vishay-Dale
R5、R7	2	电阻, 15, 5%, 0.125W, AEC-Q200 0 级, 0805	CRCW080515R0JNEA	Vishay-Dale
R6	0	未使用, 0402	CRCW04021M00JNED	Vishay-Dale
R8	1	电阻, 169k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW0402169KFKED	Vishay-Dale
R9	1	电阻, 93.1k Ω , 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040293K1FKED	Vishay-Dale
R10、R24	2	电阻, 1.0M Ω , 5%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW04021M00JNED	Vishay-Dale
R11	1	电阻, 10, 5%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040210R0JNED	Vishay-Dale
R12	0	未使用, 1206	CRCW120610R0JNEA	Vishay-Dale
R13	1	电阻, 39.2k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040239K2FKED	Vishay-Dale
R14	1	电阻, 191k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW0402191KFKED	Vishay-Dale
R15	1	电阻, 100, 5%, 0.125W, AEC-Q200 0 级, 0805	CRCW0805100RJNEA	Vishay-Dale
R16、R29、R41	3	电阻, 10.0k Ω , 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040210K0FKED	Vishay-Dale
R17	1	电阻, 0, 0%, 0.2W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW04020000Z0EDHP	Vishay-Dale
R18、R27	2	电阻, 511, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW0402511RFKED	Vishay-Dale
R19	1	电阻, 402, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW0402402RFKED	Vishay-Dale
R20	1	电阻, 15.4k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040215K4FKED	Vishay-Dale
R21	1	电阻, 0.22, 1%, 0.5W, 1210	MCR25JZHFLR220	Rohm
R22	1	电阻, 0, 5%, 0.063W, 0402	RC0402JR-070RL	Yageo America
R23	1	电阻, 6.98k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW04026K98FKED	Vishay-Dale
R25	1	电阻, 150k, 1%, 0.1W, AEC-Q200 0 级, 0402	ERJ-2RKF1503X	Panasonic
R26	1	电阻, 15.0k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040215K0FKED	Vishay-Dale
R28	1	电阻, 0.68, 1%, 0.125W, AEC-Q200 0 级, 0805	ERJ-6RQFR68V	Panasonic
R30	1	电阻, 20.0k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040220K0FKED	Vishay-Dale
R31	1	电阻, 30.0k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040230K0FKED	Vishay-Dale
R32	1	电阻, 5.62k Ω , 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW04025K62FKED	Vishay-Dale
R33、R34、R35	3	电阻, 220k, 5%, 0.25W, AEC-Q200 0 级, 1206	CRCW1206220KJNEA	Vishay-Dale

表 11-1. UCC28781EVM-053 物料清单 (continued)

标识符	数量	说明	器件型号	制造商
R36	1	电阻, 102Ω, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW0402102RFKED	Vishay-Dale
R37、R38	2	电阻, 2.10kΩ, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW04022K10FKED	Vishay-Dale
R39	1	电阻, 27.4k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW040227K4FKED	Vishay-Dale
R40	1	电阻, 1.00k, 1%, 0.063W, AEC-Q200 0 级, 0402	CRCW04021K00FKED	Vishay-Dale
RT1	1	热敏电阻 NTC, 47kΩ, 5%, 0603	NCP18WB473J03RB	MuRata
SH-J1	1	分流器, 100mil, 镀锡, 黑色	SNT-100-BK-T-H	Samtec
T1	1	UCC28781EVM-053 的反激式变压器	RLTI-1431	Renco
TP1、TP3	2	测试点, 多用途, 黑色, TH	5011	Keystone Electronics
TP2、TP4、TP5	3	测试点, 多用途, 白色, TH	5012	Keystone Electronics
U1	1	具有专用同步整流器栅极驱动的零电压开关反激式控制器	UCC28781QRTWRQ1	德州仪器 (TI)
U2	1	具有高噪声抗扰性的 4A/6A、单通道增强型隔离栅极驱动器, DWV0008A (SOIC-8)	UCC5304DWV	德州仪器 (TI)
U3	1	2.5V 低 Iq 可调精密并联稳压器, DBZ0003A (SOT-23-3)	ATL431AIDBZR	德州仪器 (TI)
U4	1	光耦合器晶体管输出 5000Vrms 1 通道 6-SO	TLP383(GR-TPL,E	Toshiba

12 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (January 2022) to Revision A (December 2022)	Page
• 将图像更新为 Rev B 板。删除了对返工的提及.....	4
• 将输入线电压从 40V 更改为 50V.....	5
• 更新了 3 个原理图图像.....	7
• 更改了 250V、LO 范围的 Iout%.....	14
• 添加了 180V _{AC} 数据.....	15
• 更新了 4 个 PCB 图像.....	22
• 更新了 BOM, 使其与更新后的原理图保持一致.....	24

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