

说明

TIDM-2014 是一款由德州仪器 (TI) 和 Wolfspeed 开发的基于 SiC 的 800V、300kW 牵引逆变器系统参考设计，该参考设计为设计工程师创建高性能、高效率的牵引逆变器系统并更快地将其推向市场提供了基础。该设计采用具有实时可变栅极驱动强度的高性能隔离式栅极驱动器、具有集成变压器的隔离式辅助电源以及 TI 的高实时性能 MCU，即使在超过 20,000 RPM 的速度下也能控制牵引电机，同时满足功能安全要求。

资源

TIDM-02014	设计文件夹
UCC5880-Q1、AM2634-Q1	产品文件夹
TMS320F280039C-Q1、UCC14240-Q1	产品文件夹
UCC12051-Q1、AMC3330-Q1	产品文件夹
TCAN1462-Q1、ISO1042-Q1、ALM2403-Q1	产品文件夹

特性

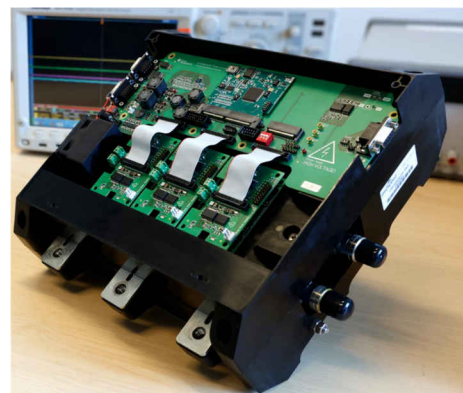
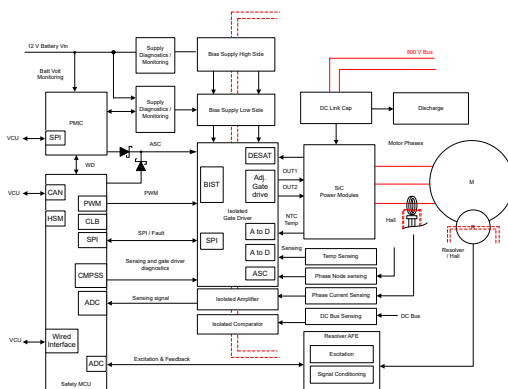
- 实时可变栅极驱动强度功能可通过尽可能地减小 SiC 开关功率损耗来提高系统效率，而精确的辅助电源可以尽可能地减小导通损耗。
- 隔离式栅极驱动器和辅助电源模块可将 PCB 面积减小 30%。
- 高性能 MCU 可实现业界极快的电机控制环路 (<2 μ s)，这有助于尽可能地减小扭矩纹波并为牵引电机提供平滑的速度和扭矩电流曲线。
- UCC5880-Q1 和 AM2634-Q1 是以符合功能安全标准目标的器件。
- 凭借增强型电容隔离技术和早期故障检测功能提高系统可靠性。

应用

- [混合动力汽车/电动汽车牵引逆变器](#)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

牵引逆变器系统是电动汽车的核心子系统。该系统不仅在加速度和速度方面直接影响驾驶员体验，而且还影响电动汽车的可行行驶里程。TIDM-02014 参考设计是 TI 和 Wolfspeed 提供的基于 SiC 的 800V、300kW 逆变器参考设计，该参考设计尝试为设计人员和工程师提供着手点，来实现高性能、高效率牵引逆变器系统。

该设计展示了牵引逆变器系统技术，该技术通过使用高性能隔离式栅极驱动器减少可用电压的过冲来提高系统效率。栅极驱动器的实时可变驱动强度可提高逆变器效率。隔离式栅极驱动器与 TI 的隔离式辅助电源设计相结合，显著减小了 PCB 尺寸，使 PCB 面积缩小为原来的二分之一以下，高度小于 4mm，并消除了 30 多个分立元件，从而提高了系统功率密度。此外，TI 的高控制性能 MCU 具有紧密集成的出色实时外设，即使在速度超过 20,000RPM 时也能实现有效的牵引电机控制。快速电流环路实现有助于尽可能地减少电机扭矩纹波，并提供平滑的速度-扭矩曲线。系统的机械和热设计由 Wolfspeed 提供。

WARNING

TI 建议，该参考设计仅可在实验室环境中运行，不应将此参考设计作为成品供一般消费者使用。

TI 建议，该参考设计仅可由熟悉处理高压电子和机械部件、系统及子系统所存在相关风险的合格工程师和技术人员使用。

高电压！ 电路板中存在可接触的高电压。如电路板的电压和电流处理不当或施加不正确，则可能导致电击、火灾或伤害事故。使用该设备时应特别小心，并采取相应的保护措施，以避免伤害自己或损坏财产。

CAUTION

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。

1.1 主要系统技术规格

表 1-1 总结了关键系统规格。

表 1-1. 主要系统技术规格

参数	规格 (单位)	注释
P_{out}	300kW	额定输出功率
V_{DSmax}	1200 V	最大漏源电压
V_{DC}	800V	建议的直流总线电压
I_{DC}	300 A	直流总线电流
f_{swmax}	60kHz	基于栅极驱动器辅助电源
I_L	360 A	交流输出 RMS 电流
L_{PL}	5.3nH	寄生电感，包括直流链路电容器和汇流条
C_{DC}	300 μ F	直流链路电容器
L_{DC}	3.5nH	直流总线电容器 ESL
功率密度	32 kW/L	
尺寸	28cm x 29cm x 11.5cm	
重量	6.2 kg	
体积	9.3L	
面积	812 cm ²	
P	5 巴	冷却液工作压力
ΔP	200 毫巴	压力降

- 有关隔离式栅极驱动器的信息，请参阅 [UCC5880-Q1](#) 数据表。
- 有关微控制器的信息，请参阅 [AM2634-Q1](#) 和 [TMSF280039C-Q1](#) 数据表。
- 有关辅助电源的信息，请参阅 [UCC14240-Q1](#) 数据表。
- 有关集成模块的信息，请参阅 [CAB450M12XM3](#) 数据表。
- 对于较高的环境温度，必须根据所包含的直流链路电容器额定值对直流链路电压和直流链路电流进行降额。有关更多详细信息，请参阅 [FTCAP GmbH](#) 提供的 [1100V/100 \$\mu\$ F CX100 \$\mu\$ 1100d51KF6](#) 数据表。
- 随附的冷板是 [Wieland MicroCool CP3012-XP](#)。要根据流量 (升/分钟) 计算热阻 (°C/W) 和压力降 (巴)，请参阅 [Wieland MicroCool Inc.](#) 提供的 [CP3012-XP](#) 数据表，以了解更多详细信息。
- 随附的电流传感器板使用 [LEM LF 510-S](#)。有关更多详细信息，请参阅 [LEM USA Inc](#) 提供的 [LF 510-S](#) 数据表。

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 所示为该参考设计的方框图，并突出显示了主要 TI 元件。

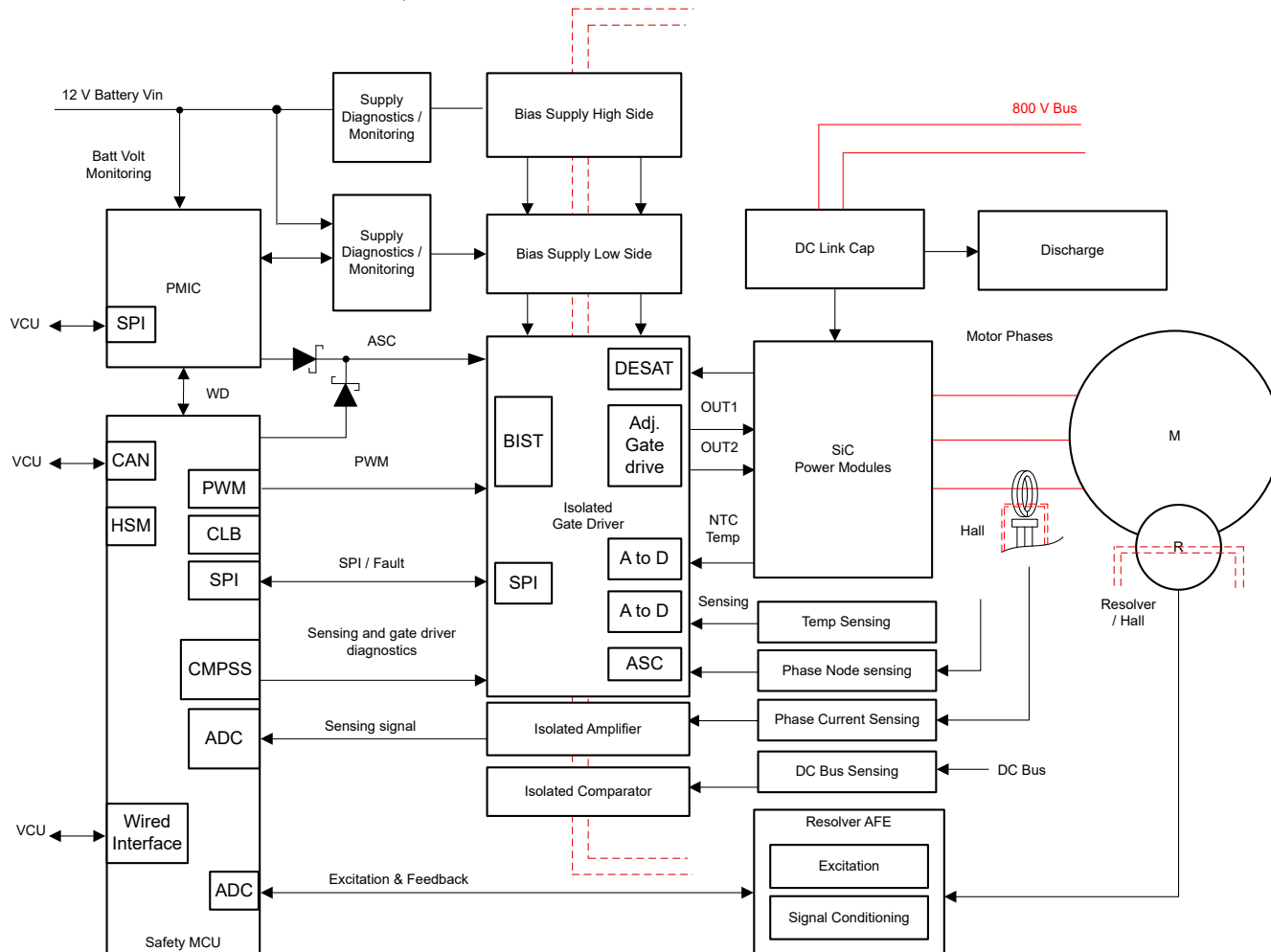


图 2-1. TIDM-02014 SiC 逆变器系统方框图

2.2 设计注意事项

牵引系统的主要目标是以高控制带宽高效驱动牵引电机，通常是感应电机或内置式永磁同步电机 (IPMSM)。为此，TIDM-02014 采用 C2000 实时控制 MCU 来实施磁场定向控制 (FOC) 方案以驱动电机。该设计还支持 TI 基于 Sitara™ AM263x MCU 的控制实施，可实现高实时性能，同时满足功能安全要求。

为了实现 SiC 逆变器的高效运行，采用了符合功能安全标准的 UCC5880-Q1 隔离式栅极驱动器设计。除高级配置和保护功能之外，UCC5880-Q1 的实时可变栅极驱动器强度功能还可实现效率优化。栅极驱动辅助电源设计采用具有集成隔离变压器和后置稳压功能的 UCC14240-Q1 辅助电源器件。UCC14240-Q1 具有严格的稳压功能，可极大地降低器件在运行期间的导通损耗。借助这些设计，栅极驱动 BOM 和 PCB 尺寸可减小高达 30%。

功率级的设计理念旨在通过高载流量、低电感设计尽可能地提高性能，同时尽可能地降低成本和复杂性。为了实现这一目标，需要考虑五个关键参数。首先，由于 SiC 模块的电流密度高且尺寸相对较小，因此采用了高性能热叠层以尽可能地提高热传递。其次，通过使用低电感、重叠平面结构，尽可能地降低总线结构引入的杂散电感。第三，必须使用具有低电感和高纹波额定值的电容器来有效地闭合高频开关环路。第四，利用栅极驱动器高速保护和抗噪特性来有效开关 SiC 模块并提供尽可能大的故障承受能力。最后，功率级设计旨在尽可能地降低组装和制造的复杂性以及系统成本。该逆变器的尺寸为 279mm x 291mm x 115mm，总体积为 9.3L，功率密度高达 32.25kW/L，是同类基于硅 (Si) 的逆变器的 2 倍多。

2.3 重点产品

该参考设计采用以下德州仪器 (TI) 器件。

2.3.1 UCC5880-Q1

UCC5880-Q1 是一款符合功能安全要求的隔离式栅极驱动器，适用于电动汽车/混合动力汽车牵引逆变器应用。凭借可调栅极驱动强度 SPI 编程、消隐时间、抗尖峰脉冲、阈值、功能使能和故障处理的灵活性，UCC5880 能够支持所有电动汽车/混合动力汽车牵引逆变器应用中使用的各种 IGBT 或 SiC 功率晶体管。UCC5880-Q1 集成了大多数牵引逆变器应用所需的所有保护特性。此外，20A 栅极驱动能力消除了对外部升压电路的需求，从而减小了整体设计的尺寸。集成式米勒钳位电路可在瞬态事件期间使栅极保持关断状态，并可配置为使用内部 4A 下拉电流或驱动外部 n 沟道 MOSFET。基于内部电容器的先进隔离技术可以极大地提高 CMTI 性能，同时极大地降低辐射发射。

2.3.2 AM2634-Q1

AM263x Sitara™ Arm® 微控制器旨在满足下一代工业和汽车嵌入式产品复杂的实时处理需求。AM263x MCU 系列包含多个具有多达四个 400MHz Arm® Cortex®-R5F 内核的引脚对引脚兼容器件。对于不同的功能安全配置，可以选择将多个 Arm® 内核编程为在锁步选项中运行。工业通信子系统 (ICSS) 支持集成工业以太网通信，例如 PROFINET IRT、TSN 或 EtherCAT® (以及许多其他工业以太网)，或用于标准以太网连接或自定义 I/O 接口。

AM263x 系列设计用于先进的电机控制和带有先进模拟模块的数字电源控制应用。

2.3.3 TMS320F280039C-Q1

TMS320F280039C-Q1 是 C2000™ 实时微控制器系列的 32 位 DSP，可以为从片上闪存或 SRAM 运行的浮点或定点代码提供 120MHz 的信号处理性能。浮点单元 (FPU)、三角函数加速器 (TMU) 和 VCRC (循环冗余校验) 扩展指令集进一步增强了 C28x CPU 的性能，从而加快了实时控制系统关键常用算法的速度。

CLA 允许从主 C28x CPU 上大量卸载常见任务。CLA 是一款与 CPU 并行执行的独立 32 位浮点数学加速器。此外，CLA 自带专用存储资源，可以直接访问典型控制系统中所需的关键外设。与硬件断点和硬件任务切换等主要特性一样，ANSI C 子集支持是标准配置。

2.3.4 UCC14240-Q1

UCC14240-Q1 集成了一个高效、低辐射隔离式直流/直流转换器，可为牵引逆变器电机驱动器、工业电机驱动器或其他高压直流/直流转换器中的 SiC 或 IGBT 功率器件的栅极驱动器供电。该直流/直流转换器通过 3000V_{RMS} 基本隔离栅提供大于 1.5W 的功率。TI 还推出了更新的增强型隔离器件 UCC14341-Q1，该器件接受 15V 输入并同样提供高达 25V 的可调隔离输出。为了优化 BoM，UCC14341-Q1 可以直接连接到牵引逆变器中很常见的 15V 旋转变压器电源轨。

2.3.5 UCC12051-Q1

UCC12051-Q1 是一款具有 5kV_{RMS} 隔离额定值的汽车级直流/直流电源模块，旨在为需要偏置电源及稳压输出电压的隔离电路提供有效的隔离电源。该模块集成了具有专有架构的变压器和直流/直流控制器，可提供 500mW (典型值) 的隔离功率，并具有低 EMI。UCC12051-Q1 集成了保护功能以提高系统稳健性。该模块还具有使能引脚、同步功能以及 5V 或 3.3V 稳压输出选项 (带净空电压)。

2.3.6 AMC3330-Q1

AMC3330-Q1 是一款具有高输入阻抗和集成式直流/直流转换器的全差分精密隔离式放大器，允许从低压侧的单个 3.3V 或 5V 电压电源为器件供电。该器件的输入级驱动一个二阶 $\Delta-\Sigma$ 调制器。调制器使用内部电压基准和时钟发生器将模拟输入信号转换为数字比特流。驱动器 (在功能方框图中称为 TX) 通过隔离高侧和低侧电压域的隔离栅传输调制器的输出。接收的比特流和时钟由低侧的四阶模拟滤波器进行同步和处理，并呈现为差分模拟输出。

2.3.7 TCAN1462-Q1

TCAN1462-Q1 是高速控制器局域网 (CAN) 收发器，满足 ISO 11898-2:2016 高速 CAN 规范的物理层要求并符合 CiA 601-4 信号改善功能 (SIC) 规范。该器件可减少显性到隐性边缘的信号振铃，并能在复杂的网络拓扑中实现更高的吞吐量。借助信号改善功能，许多应用能够在具有多个无端桩线的大型网络中以 2Mbps 、 5Mbps 甚至更高的速率工作，从而发挥 CAN FD (灵活数据速率) 的真正优势。

该器件还满足 CiA 601-4 要求的时序规范，因此与普通的 CAN FD 收发器相比，具有更严格的位时序对称性。这提供了更大的时序窗口来对正确的位进行采样，并能够在固有振铃和位失真的大型复杂星形网络中实现无差错通信。

2.3.8 ISO1042-Q1

ISO1042-Q1 器件是一款符合 ISO11898-2 (2016) 标准规格的电隔离控制器局域网 (CAN) 收发器。ISO1042-Q1 器件提供 $\pm 70\text{V}$ 直流总线故障保护功能和 $\pm 30\text{V}$ 共模电压范围。该器件在 CAN FD 模式下最高支持 5Mbps 数据传输率，与经典 CAN 相比可实现更为快速的载荷传输。该器件采用二氧化硅 (SiO_2) 绝缘栅，可承受 $5000\text{V}_{\text{RMS}}$ 的电压和 $1060\text{V}_{\text{RMS}}$ 的工作电压。电磁兼容性得到了显著增强，可实现系统级 ESD、EFT 和浪涌并符合辐射标准。与隔离式电源一起使用，此器件可抵御高电压冲击，并防止总线的噪声电流进入本地接地。虽然 ISO1042-Q1 器件可用于基本隔离和增强隔离，但该参考设计使用具有增强隔离功能的器件。

2.3.9 ALM2403-Q1

ALM2403-Q1 是一款双电源运算放大器，其特性和性能使该器件更适合基于旋转变压器的应用。该器件具有高增益带宽和压摆率以及连续高输出电流驱动功能，非常适合为激励旋转变压器初级线圈提供所需的低失真和差分高振幅激励。尤其在易受故障影响的电线上驱动模拟信号时，电流限制和过热检测功能可增强整体系统稳健性。

2.3.10 LM5158-Q1

LM5158x-Q1 是一款采用峰值电流模式控制的宽输入范围非同步升压转换器。该器件可用于升压、SEPIC 和反激式拓扑。该器件可在最低 3.2V 电压下启动。如果 BIAS 引脚电压大于 3.2V ，则该器件可在低至 1.5V 的输入电源电压下运行。内部 VCC 稳压器还支持 BIAS 引脚在高达 60V (绝对最大值 65V) 的电压下运行，用于汽车负载突降。用户可通过外部电阻器对开关频率进行动态编程，编程范围为 100kHz 至 2.2MHz 。 2.2MHz 的开关频率可以尽可能地降低 AM 频带干扰，并支持实现小设计尺寸和快速瞬态响应。该器件提供可选的双随机展频技术，以帮助在宽频率范围内降低 EMI。

2.3.11 LM74202-Q1

LM74202-Q1 是一款具有集成背靠背 FET 和增强型内置保护电路的二极管。LM74202-Q1 为所有由 4.2V 至 40V 供电的系统和应用提供强大的保护。该器件集成了电池反向输入、反向电流、过压、欠压、过流和短路保护功能。精密过流限制 (1A 时为 $\pm 5\%$) 有助于尽可能地减小输入电源的过设计，而快速响应短路保护功能可在检测到短路时立即将负载与输入隔离。该器件允许用户使用外部电阻器在 0.1A 和 2.23A 之间对过流限制阈值进行编程。该器件监测总线电压以实现欠压和过压保护，并将 FLTb 引脚设置为有效以通知下游系统。

2.4 系统设计原理

2.4.1 微控制器

微控制器作为主控制单元，是系统的核心。为了展示 TI MCU 器件提供的广泛特性和功能，TIDM-02014 设计支持 TI C2000™ 和 Sitara™ MCU 系列器件。为了简化两款器件之间的切换，使用了其各自的引脚兼容控制卡评估模块。下面将进一步介绍控制卡的功能。

2.4.1.1 微控制器 - C2000™

F280039C controlCARD (TMDSCNCD280039C) 提供了一种了解 F28003x 器件并对其进行实验的好方法。该 controlCARD 旨在提供滤波良好的稳健设计，能够在牵引逆变器、车载充电器、直流/直流转换器等严苛应用中工作。借助板载调试器，F280039C controlCARD 提供了一种简单的方法来评估 F28003x MCU 器件的强大实时功能。

与 AM263x 控制卡类似，F280039C 控制卡可直接插入 WolfSpeed 主控制板。但是，请注意，在控制卡之间切换时，需要在控件卡上安装或从中移除几个电阻器。节 3.1 提供了电阻器更改的详细信息。

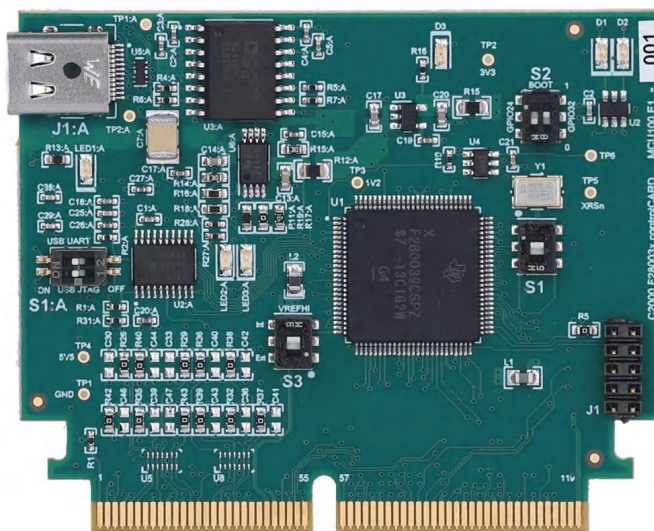


图 2-2. F280039C 控制卡

2.4.1.2 微控制器 - Sitara™

AM263x 控制卡评估模块 (EVM) 是一款适用于德州仪器 (TI) Sitara™ AM263x 系列微控制器 (MCU) 的评估和开发板。此 EVM 具有用于编程和调试的板载仿真功能以及用于简化用户界面的按钮和 LED，可让您在 AM263x MCU 上轻松开始开发牵引逆变器设计。该控制卡还支持通过接头引脚访问重要信号，以进行快速原型设计。

该控制卡直接插入 WolfSpeed 主控制板，并得到软件的全面支持，使客户能够快速开发其牵引逆变器设计，以尽可能地提高 AM263x MCU 的内置性能和集成度。



图 2-3. AM263x Sitara™ 控制卡

2.4.2 隔离式偏置电源

如图 2-4 中的原理图所示，UCC14240-Q1 直流/直流转换器模块采用单个 24V (P24V) 输入，配置为向 UCC5880-Q1 隔离式栅极驱动器提供 +15V (VCC2)、-4V (VEE2) 双路 3kV RMS 隔离辅助电源电压轨。VCC2 和 VEE2 由电阻分压器 R13、R19 和 R15、R20 进行编程，严格调节在 $\pm 1.3\%$ 以内，提供 Wolfspeed XM3 SiC 半桥模块建议的 +15V 和 -4V 电压。当数字主机首先提供将 UCC14240-Q1 ENA 引脚拉至高电平有效状态所需的使能信号 (EN_PS) 时开始启动，从而使 VCC2 和 VEE2 能够软启动。然后，UCC14240-Q1 提供低电平有效、兼容 LVTTTL 的电源良好信号 (N_PG)，通知主机 P24V 高于 21V、UVLO 开启阈值以及 VCC2 和 VEE2 高于其设定调节目标值的 90% (分别为 $V_{CC2} > 13.5V$ 和 $V_{EE2} > 3.6V$)。主机和 UCC14240-Q1 之间的这种连接可确保 UCC5880-Q1 栅极驱动器具有足够的偏置电压，以安全地允许开始进行逆变器开关。

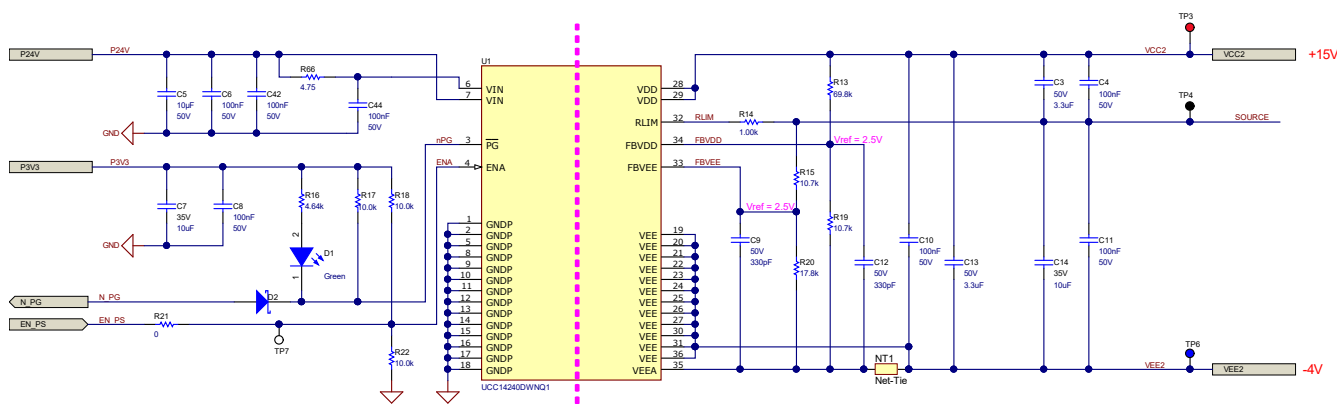


图 2-4. UCC14240-Q1 辅助电源原理图

2.4.3 电源树

2.4.3.1 引言

控制板包含完整的电源树，可运行系统上的所有功能。电源树为以下设备供电：

- 所有板载外设
- 栅极驱动器板
- MCU 控制卡（基于 C2000 或基于 AM263x）
- 内部和外部传感器

假定外部离线直流适配器与该板一起使用。适配器必须指定为 12VDC 标称值 (8-16VDC)、3.3ADC。

电源通过带有 2mm 中心引脚 J100 的桶形插孔连接器进行连接（请参阅器件[数据表](#)）。

2.4.3.2 电源树方框图

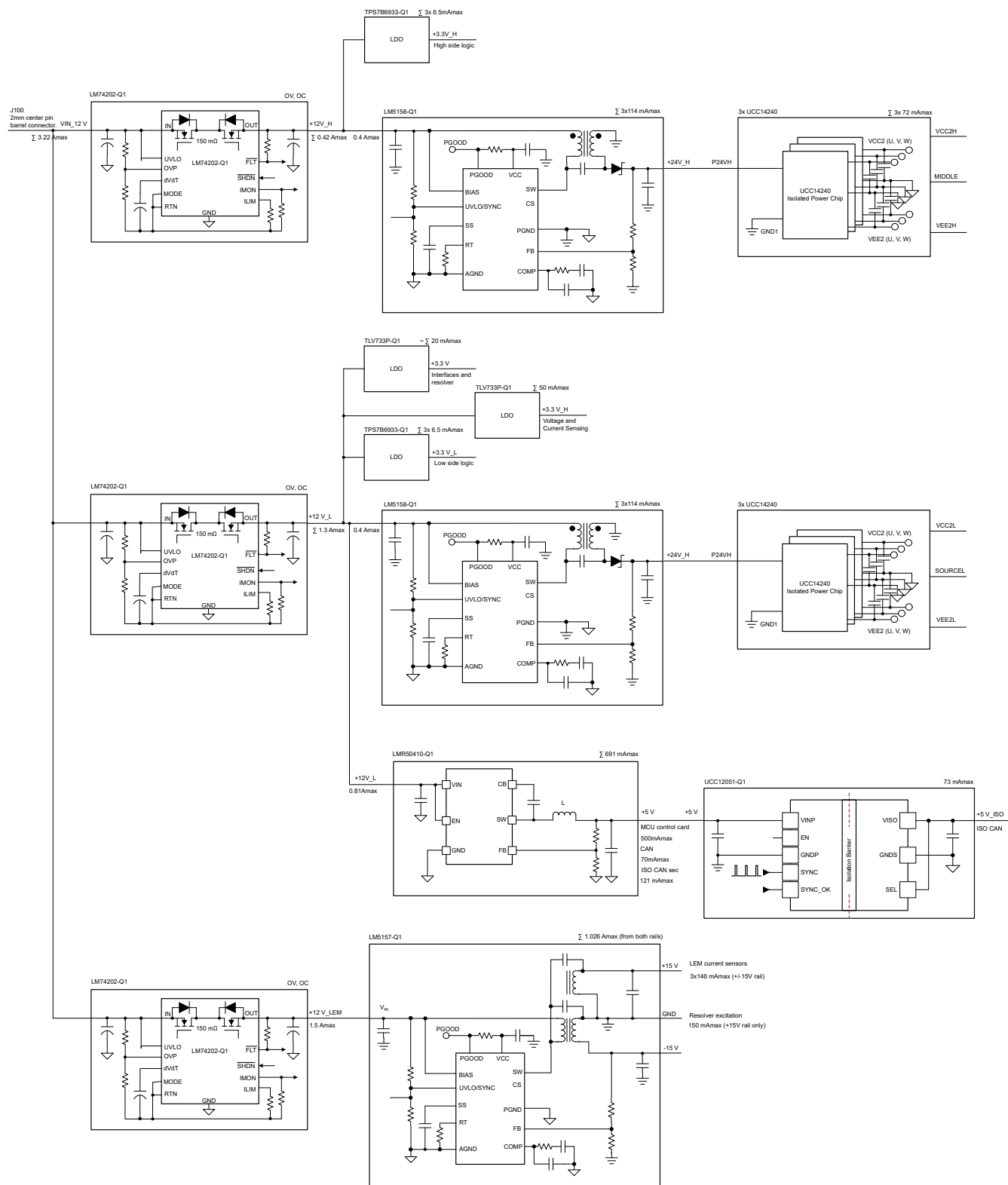


图 2-5. 电源树方框图

2.4.3.3 12V 分配和控制

12 伏域被分配到三个单独的电源轨中。

表 2-1. 12V 分配和控制

电源轨	稳压器	负载	最大电流
+12V_H	基于 LM5158-Q1 的 SEPIC	高侧 24 伏域	0.4 A
	TPS7B6933-Q1 LDO	高侧 3.3 伏逻辑	0.02A
+12V_L	基于 LM5158-Q1 的 SEPIC	低侧 24 伏域	0.4 A
	TPS7B6933-Q1 LDO	低侧 3.3 伏逻辑	0.02A
	TLV733P-Q1 LDO	高电压检测和电流检测信号调节	0.05A
	TLV733P-Q1 LDO	数字接口和旋转变压器前端	0.02A
	LMR50410-Q1 Simple Switcher®	5 伏电源域	0.81A
+12V_LEM	基于 LM5157-Q1 的 SEPIC	LEM 电流传感器模块	1.5A
		旋转变压器励磁	

这些电源轨由 LM74202-Q1 理想二极管进行分离和保护。

LM74202-1 的主要功能是提供过压 (OV) 和短路保护。出于调试或实验目的，当通过不同电源 (例如通过编程 USB 电缆) 供电时，MCU 可以使用逻辑信号 (Power_EN_LoadSW) 控制 LM74202-Q1。

2.4.3.4 栅极驱动器电源

隔离式栅极驱动器单元 (GDU) (UCC5880-Q1) 的低电压域由 TPS7B6933-Q1 LDO 供电。使用 UCC14240-Q1 隔离式直流/直流模块为 GDU 的高电压 (HV) 域供电。选择这些模块是因为其紧凑性和易用性。

UCC14240-Q1 生成的电压被设置为总共 19V ($V_{CC2} = 15V$, $V_{EE2} = -4V$)。高压负极是 UCC14240-Q1 的虚拟接地。

每个 UCC14240-Q1 直流/直流模块高压侧的最大功率消耗可估算为 $f_{SWmax} = 30kHz$ 和 $C_L = 100nF$ 时的最坏情况开关条件：

$$P2 = f_{SWmax}(V_{CC2} - V_{EE2})^2 C_L + (V_{CC2} - V_{EE2}) I_{CCQ2} \quad (1)$$

数据表中提供了 UCC5880-Q1 的次级静态电流，即 $I_{CC2q} = 15mA$ 。由此计算得出的次级功耗为 1.368W。假设效率为 50%，这对应于每个 UCC14240-Q1 24 伏输入侧的电源电流为 114mA。

这些 UCC14240-Q1 直流/直流模块需要预调节 24V 电压。24 伏前置稳压器作为基于 LM5158-Q1 且具有耦合电感器的 SEPIC 实现。SEPIC 拓扑支持适当的输入电压范围，由于其多功能性以及也适用于噪声特性的随机展频，LM5157/8-Q1 转换器专为这种情况而设计。

电源设计的元件值是使用用于 SEPIC 的 LM5158 快速入门计算器工具计算得出的。表 2-2 展示了电源的主要输入参数。

表 2-2. 栅极驱动电源的 SEPIC 转换器设计参数

参数	值			
	最小值	标称值	最大值	单位
V _{INPUT}	8	12	16	V
f _{sw}		435		kHz
V _{LOAD}		24		V
I _{LOAD}		0.35		A

每个 24 伏 SEPIC 为三个 UCC14240-Q1 供电，因此列出了 I_{LOAD} = 0.35A (请参阅图 2-5)。

2.4.3.5 5 伏电源域

5V 电源采用 LMR50410-Q1 Simple Switcher®。该电源主要为插入 HSEC PCB 连接器的 MCU 控制卡供电。

LMR50410-Q1 的最大输出电流为 1A，该电流可提供 10W 的功率预算。当效率为 90% 时，该器件在最大功率下从 12V 电源轨消耗约 0.92A 的电流。图 2-5 展示了所有支路中负载电流的真实估算。

在假定的 MCU 控制卡中，AM2634 控制卡功耗较高，因此功率预算的大小基于 AM2634 控制卡的功耗估算。

在禁用所有未使用的外设的情况下，基于 AM2634 的控制卡平均消耗 2.5W 的功率。然后，5 伏电源域提供足够的裕度来支持各种用例和工作曲线。

CAN 接口消耗 70mA 的电流，隔离式 CAN 消耗 122mA 的电流，因此总共从 5 伏电源轨消耗 192mA 的电流。使用 UCC12051-Q1 直流/直流电源模块为隔离式 CAN 接口供电。该模块在 5V 电压下提供最大 500mW 的功率并提供 5kVrms 隔离。在 ISOCAN1042-Q1 的隔离侧负载为 73mA 时，假设效率为 60%，我们预计初级侧的电流为 122mA。

2.4.3.6 电流和位置检测电源

电流和位置监测 (旋转变压器) 由 +12V_LEM 电源轨供电。LEM LF 510-S 电流传感器需要正负 15V 对称电源。

+/-15V 电源的一个电流测量通道的电流消耗定义如下 (有关详细信息，请参阅 LEM LF 510-S 数据表)：

$$I_{CCLEM}[mA] = 44 \text{ mA} + 0.2 I_{MEAS}[A] \quad (2)$$

其中 44mA 是传感器的静态电流，I_{MEAS} 是测得的电流。峰值测量电流决定了最大功耗。在本例中，我们假设峰值测量电流最大为 509A (请参阅原理图中的注释)。这对应于 146mA 的电流消耗。

+15V 电源轨为旋转变压器励磁放大器供电。电流消耗自然取决于旋变传感器类型。该功能的估算电流预算是来自 +15V 电源轨的 150mA。

在采用 LM5157-Q1 的情况下，选择了双输出 SEPIC 拓扑以提供对称的 15V 电源。同样，与 LM5158-Q1 一样，该宽输入电压转换器具有随机展频，可实现更高的噪声性能。LM5157-Q1 可同时驱动两个串联的独立 SEPIC 级。为了能够使用 LM5157/58 计算电子表格进行元件计算，必须确定总 I_{LOAD}。如果我们假设 V_{LOAD} = 15V，则需要将电流传感器的电流消耗乘以系数 2。这表示两个驱动分支 (生成 +/-15V)。I_{LOAD} 的计算公式如下：

$$I_{LOAD} = 150 \text{ mA} + 2 \times 3 \times 146 \text{ mA} = 1026 \text{ mA} \quad (3)$$

其中系数 3 表示电源上连接了三个通道，150mA 表示旋转变压器激励的功率预算。

对于计算电子表格中的元件计算，使用了以下参数：

表 2-3. 电流和位置检测电路的 SEPIC 转换器设计参数

参数	值			
	最小值	标称值	最大值	单位
V _{INPUT}	8	12	16	V
f _{sw}		435		kHz
V _{LOAD}		15		V

表 2-3. 电流和位置检测电路的 SEPIC 转换器设计参数 (continued)

参数	值			
	最小值	标称值	最大值	单位
I_{LOAD}		0.35		A

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

本节将详细介绍硬件，并说明电路板上的不同区域，以及如何为本设计指南所述的测试设置这些区域。

3.1.1 硬件板概述

图 3-1 展示了组装好的逆变器系统，其中突出展示了功能区域。后面将进一步提供这些区域的硬件详细信息。

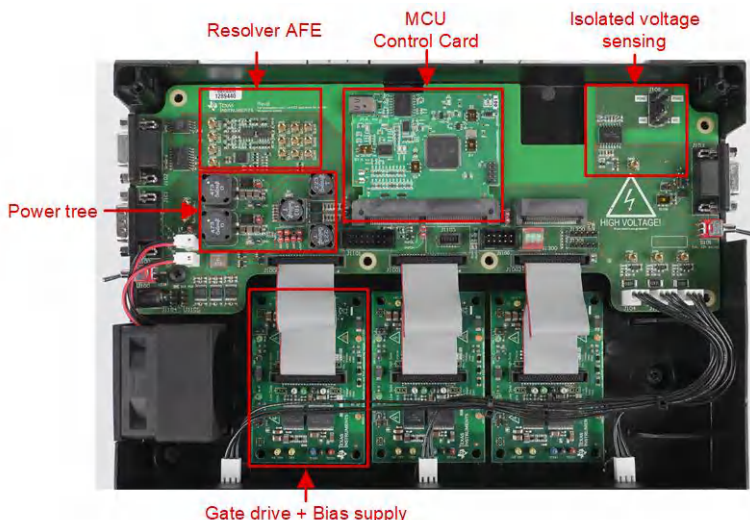


图 3-1. TIDM-02014 逆变器系统的功能区域

3.1.1.1 控制板

控制板接受 MCU 控制卡，提供辅助电源，提供用于位置、电压和电流检测、通信的接口。控制板还连接到栅极驱动器和辅助电源板，在 MCU 和栅极驱动器之间提供电源和 SPI 连接。由于控制板接受控制卡，因此可以使用同一个板来测试采用 TI 的 AM263x MCU 和 TMS320F280039C MCU 的 TIDM-02014 系统。但是，需要注意的是，需要在两种配置之间更改几个 0R 电阻器。表 3-1 展示了更改列表。

表 3-1. 针对 AM263x 和 F280039C 配置的电阻器更改

MCU 控制卡	安装	取消安装
F280039C	R1110、R1113、R1116、R1118、R1120、R1121、R1126、R1127	R1109、R1114、R1115、R1125、R1123、R1124、R1122
AM263x	R1109、R1115、R1118、R1122、R1123、R1124、R1125	R1110、R1113、R1114、R1116、R1120、R1121、R1126、R1127

3.1.1.2 MCU 控制卡 - Sitara™

图 3-2 展示了 AM263 控制卡的主要接口和连接。

控制卡用户指南中提供了 [AM263x 控制卡](#) 的引脚排列。

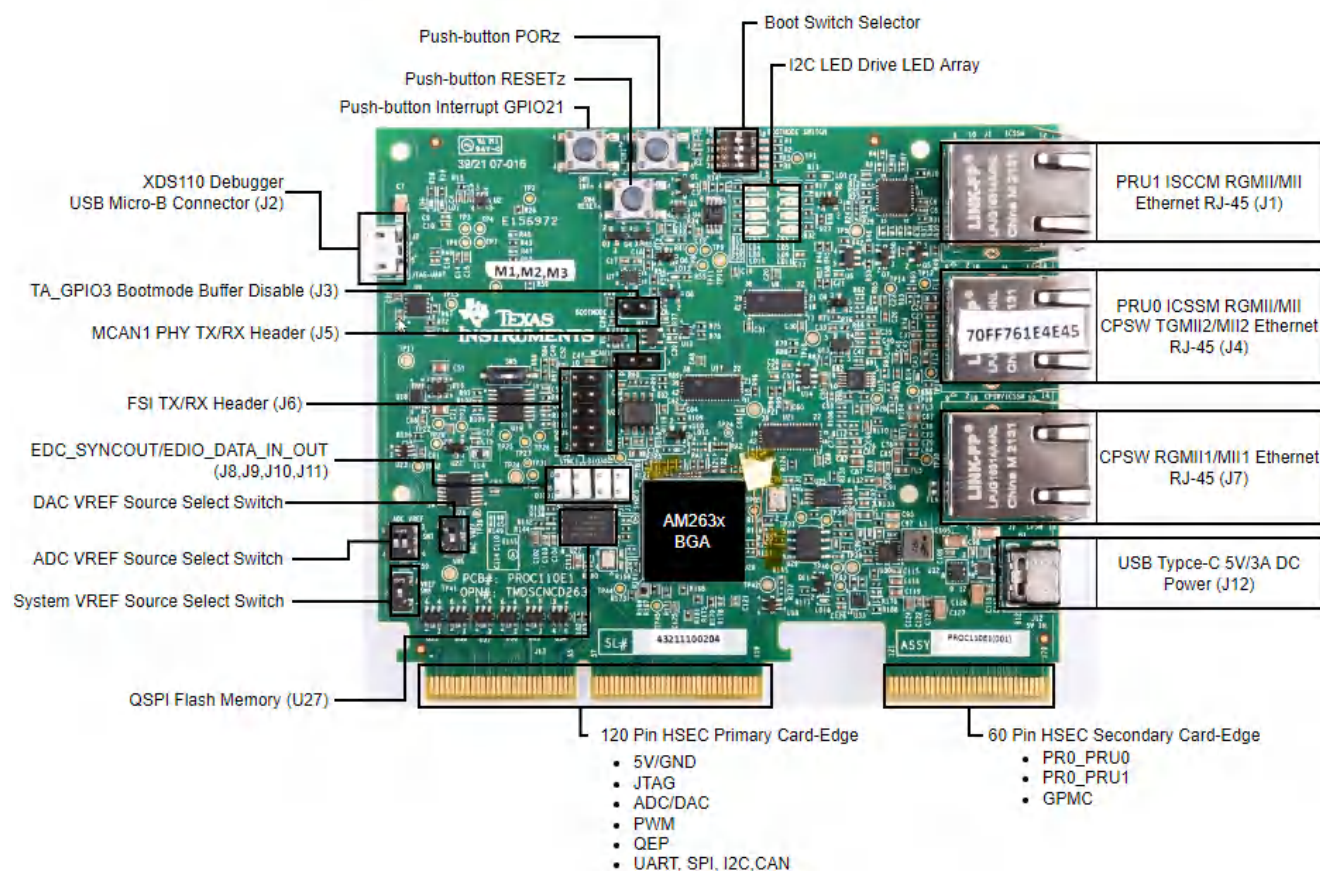


图 3-2. AM263x 控制卡硬件说明

3.1.1.3 MCU 控制卡 - C2000™

图 3-3 展示了 F280039C 控制卡的元件及其相应的功能。

控制卡用户指南 提供了有关配置和调试电路板的更多详细信息。

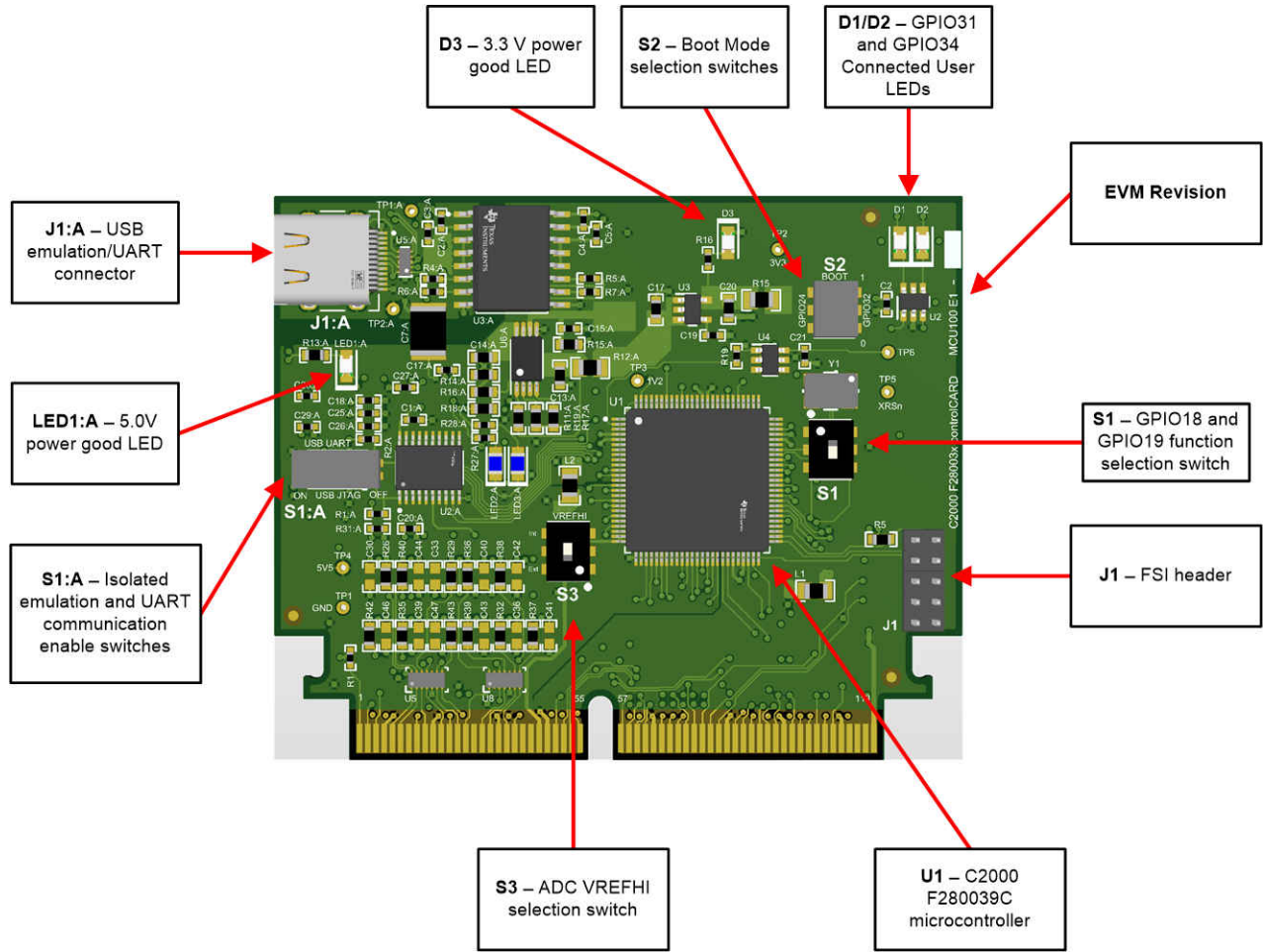


图 3-3. F280039C 控制卡硬件区域

3.1.1.4 栅极驱动器和辅助电源板

图 3-4 展示了栅极驱动器和辅助电源板上的元件和可访问测试点。表 3-2 介绍了 J9 连接器的引脚排列。

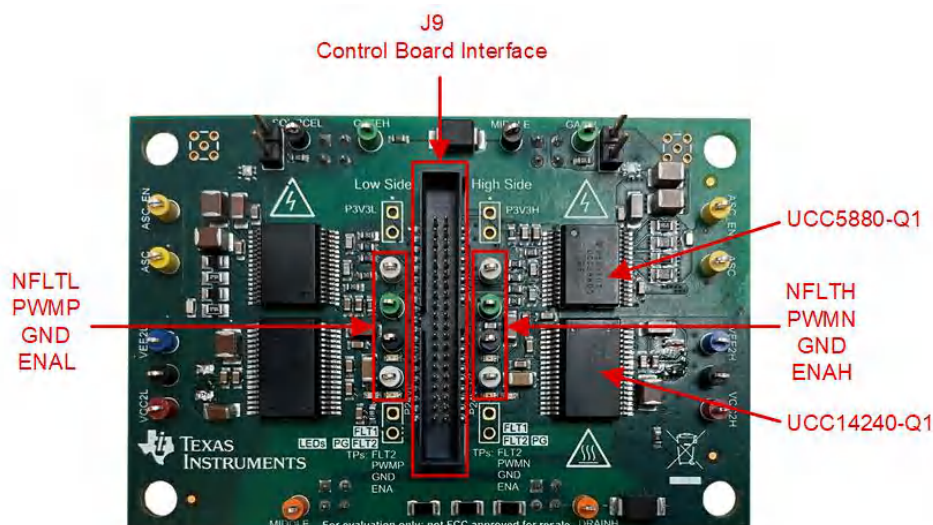


图 3-4. 栅极驱动器和辅助电源板

表 3-2. 连接器 J9 引脚排列

引脚	信号	引脚	信号
1	P3V3H_T	2	GND
3	PV3VL_T	4	GND
5	SDIL_T	6	NCSH_T
7	NCSL_T	8	SDOH_T
9	GND	10	CLK
11	GND	12	PWMN
13	GND	14	PWMP
15	GND	16	GND
17	ASCL_T	18	N_FLT2H_T
19	GND	20	N_FLT1H_T
21	GD2L_T	22	GD0H_T
23	GD1L_T	24	GD1H_T
25	GD0L_T	26	GD2H_T
27	GND	28	ASC_EN
29	N_FLT1L_T	30	ASCH_T
31	N_FLT2L_T	32	GND
33	EN_PSL_T	34	N_PGH_T
35	N_PGL_T	36	EN_PSH_T
37	P24VH_T	38	GND
39	P24VL_T	40	GND

3.1.1.5 直流总线电压检测

放电 PCB 和控制器底部连接器之间的板对板连接器提供直流总线电压的电压检测连接。这使控制器应用能够监控直流总线电压。控制器的连接器 J8 上存在最高总线电压，该电压通过分压器降压，然后在到达 ADC 输入之前进行滤波。0-1200V 直流总线电压信号被调节为 0-3V ADC 电压。

3.1.1.6 SiC 电源模块

3.1.1.6.1 XM3 SiC 电源模块

Wolfspeed 的 XM3 模块旨在通过创建既具有高性能又易于使用的全新封装来简化 SiC 电源模块。Wolfspeed 开发了一款易于使用的高性能下一代模块，该模块经过优化，旨在实现各种尺寸的市售 650 – 1700V Wolfspeed C3M™ SiC MOSFET 的最大性能。该模块能够以小封装尺寸 (53 x 80mm) 承载高电流 (300 至 600A 以上)，并采用可实现简单的总线和互连的端子布置。低电感、均匀匹配的布局可产生高质量的开关事件，从而尽可能地减少模块内部和外部的振荡。该模块的杂散电感仅为 6.7nH。当与本参考设计中的低电感总线和电容器耦合时，可获得 12nH 的总环路电感，该电感低于许多标准电源模块封装的内部杂散电感。如图 3-5 所示，XM3 平台的体积和封装尺寸仅为行业常用体积和封装尺寸的 40% 和 45%，因此为高功率密度系统提供了更紧凑的电源模块。表 3-3 列出了每个三相逆变器参考设计中包含的 XM3 模块型号。

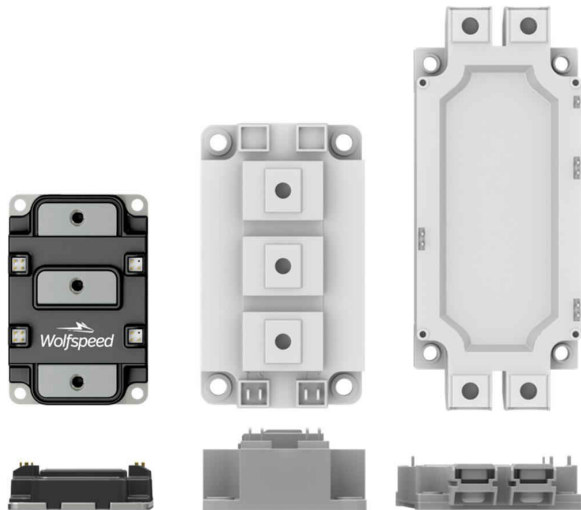


图 3-5. XM3 (左)、62mm (中) 和 EconoDUAL™ (右) 之间的尺寸比较

表 3-3. XM3 电源模块器件型号参考

参考设计	模块器件型号
CRD300DA12E-XM3	C4B450M12XM3
CRD250DA12E-XM3	C4B425M12XM3
CRD200DA12E-XM3	C4B400M12XM3

3.1.1.6.2 模块电源端子

XM3 电源模块中的电流环路经过精心设计，宽且薄，并在器件之间均匀分布，因此每个环路都在开关位置上具有等效阻抗。如图 3-6 所示，电源端子垂直偏移，这样直流链路电容器和模块之间的汇流条可以一直层压到模块，而无需弯曲、压印、支架或复杂的隔离。图 3-7 展示了一个具有代表性的三相逆变器总线。最终，这在从直流链路电容器到 SiC 器件的整个电源回路中实现了低电感。将没有器件的 XM3 模块连接到 Keysight E4990A 阻抗分析仪，以提取封装的寄生电感。在 10MHz 下，测得的从 V+ 到 V- 的电源环路电感为 6.7nH。

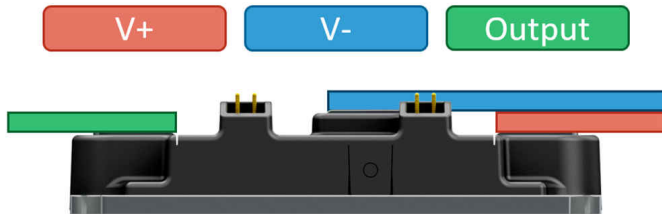


图 3-6. 显示非平面电源引线的 XM3 模块的侧视图

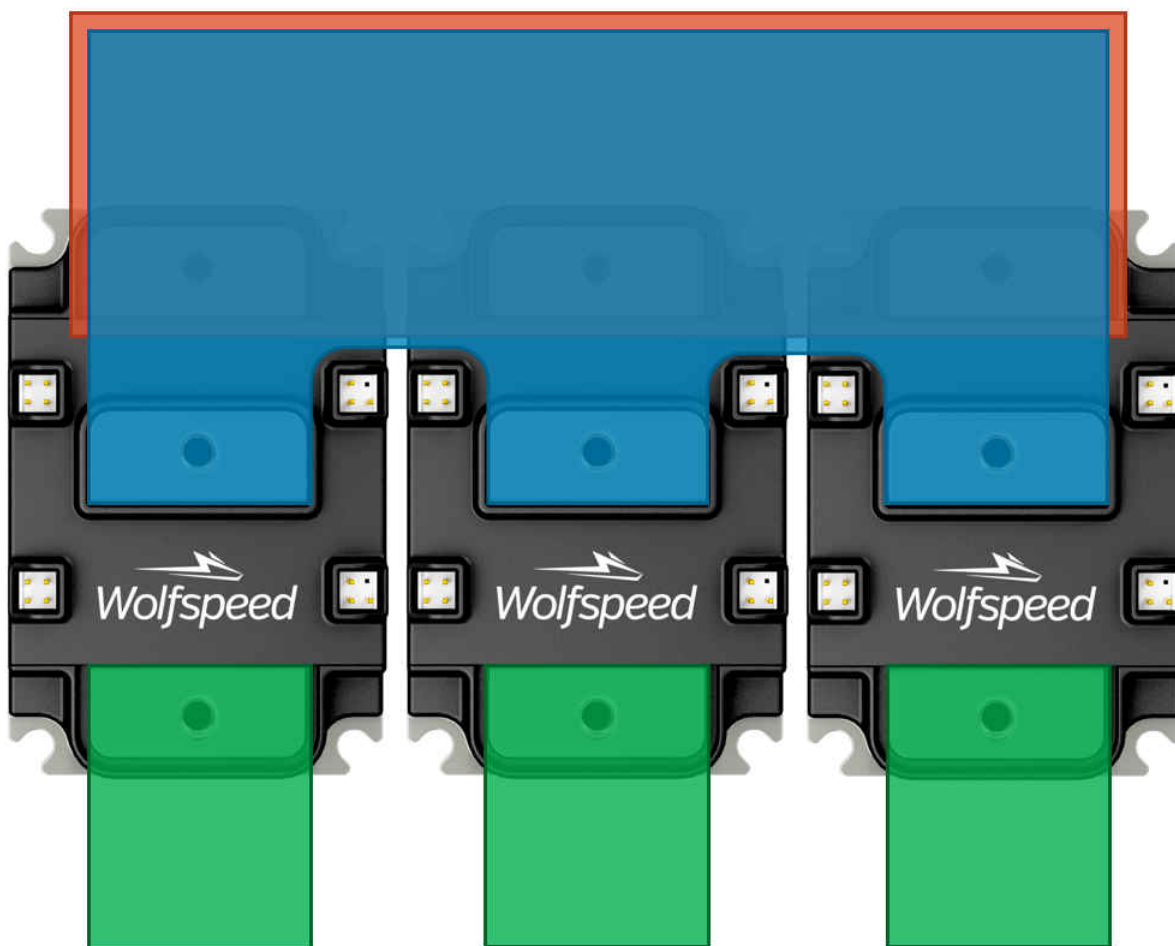


图 3-7. 显示三相总线布局的图示

3.1.1.6.3 模块信号端子

XM3 模块上的信号引脚由四组公接头引脚组成，这些引脚按功能分组，位于模块的左右边缘，如图 3-8 所示。左侧是高侧和低侧开关位置的栅极引脚及其相关的源极开尔文引脚。位于右上角的是去饱和/过流引脚，这些引脚在内部连接到 V+ 电源端子，为高侧栅极驱动器保护电路提供连接点以测量 VDS。右下角是内部负温度系数 (NTC) 温度传感器的引脚。NTC 位于电气隔离基板上，靠近开关功率较低的器件，可能需要根据应用要求进行额外的电隔离。借助 UCC5880-Q1 栅极驱动器，NTC 测量信号可实现高达 5.7kV 的隔离。右侧的信号连接器都有一个未安装的引脚，因此可以锁定栅极驱动器以防止安装不当。

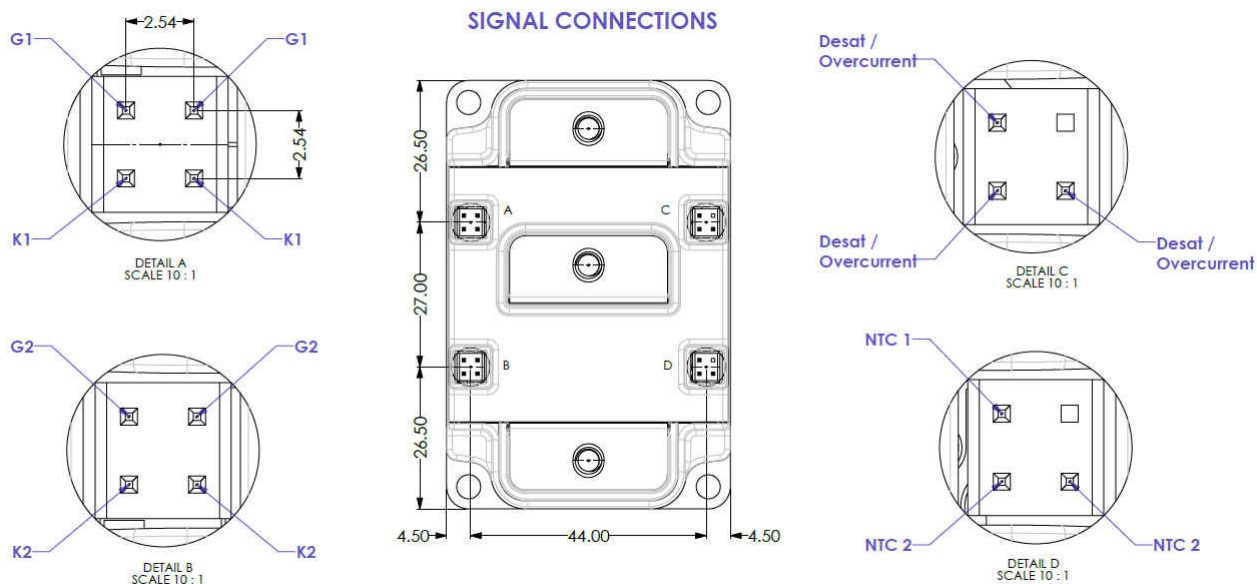


图 3-8. XM3 模块信号端子引脚排列

3.1.1.6.4 集成 NTC 温度传感器

内置于电源模块中的 NTC 温度传感器被检测并通过隔离式数字信号反馈至控制器。该信号是频率变化、占空比为 50% 的方波。温度传感器的位置尽可能靠近功率器件，同时保持与功率器件的电气隔离，因此可提供近似的底板温度。NTC 报告的温度与 SiC MOSFET 的结温有很大差异，不得用作精确的结温测量值。有两种方法可以通过控制器测量三个 XM3 模块的 NTC 反馈信号。第一种方法是使用增强型捕捉 (eCAP) 外设以数字方式测量直接来自差分接收器的信号频率。图 3-9 和表 3-4 提供了 NTC 信号频率与 NTC 温度之间的关系。对于第二种方法，频率信号经过滤波并转换为模拟信号，可以通过控制器上的 ADC 测量该模拟信号。当频率为 4.6kHz 时，模拟电压测量值为 0.38V；当频率为 30.1kHz 时，模拟电压测量值为 2.5V。

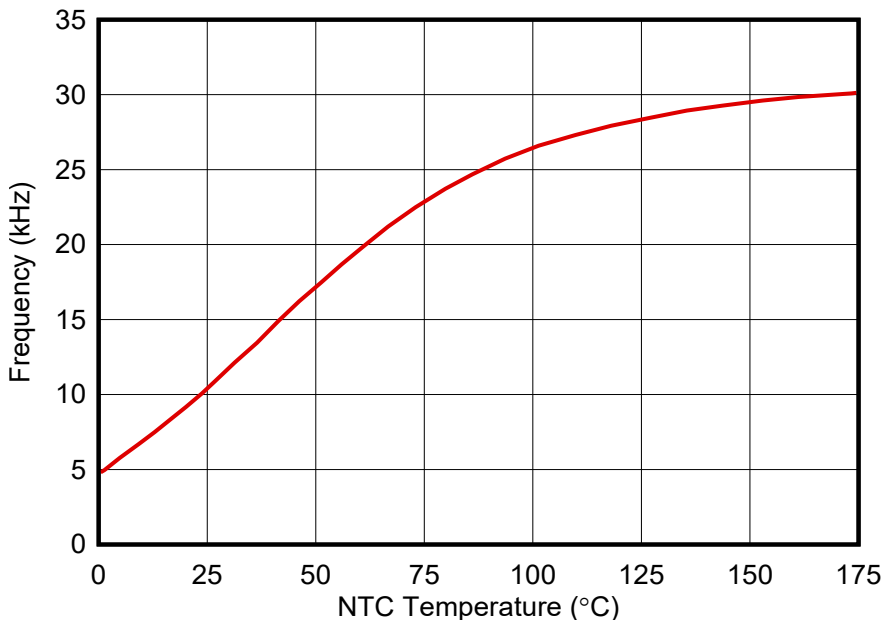


图 3-9. NTC 温度与信号频率之间的关系

表 3-4. NTC 温度、电阻和频率的相关性

NTC 温度 (°C)	NTC 电阻 (Ω)	频率输出 (kHz)
0	13491	4.6
25	4700	10.3
50	1928	17.1
75	898	22.8
100	464	26.4
125	260	28.3
150	156	29.5
175	99	30.1

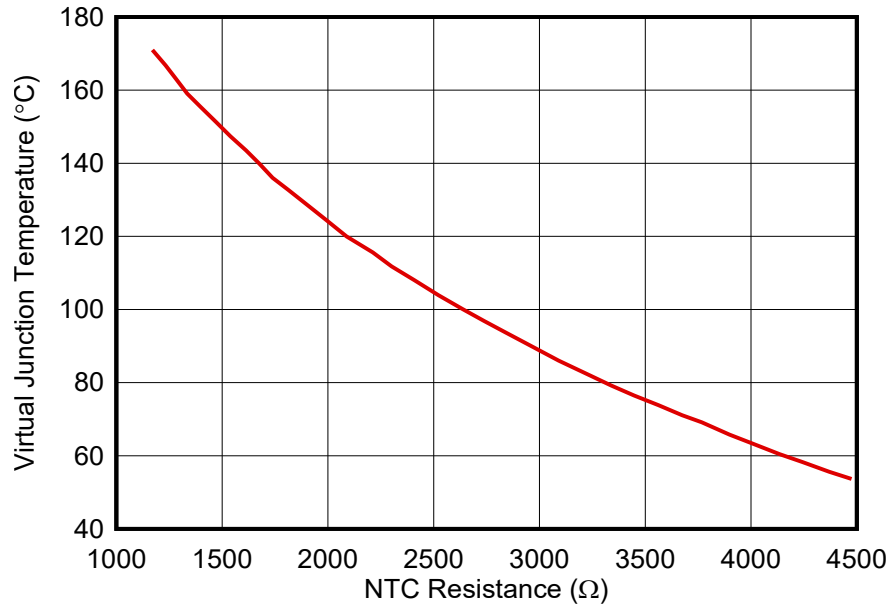
图 3-10. 使用 25°C 冷却液时 CAB450M12XM3 虚拟结温 (T_{VJ}) 与 NTC 电阻之间的关系。

图 3-10 展示了 CAB450M12XM3 模块的 NTC 电阻 (R_{NTC} ，以欧姆为单位) 与虚拟结温 (T_{VJ}) 之间的映射。可以使用以下公式来计算虚拟结温：

$$T_{VJ} = -87.12 \times \ln(R_{NTC}) + 786.14 \quad (4)$$

控制器 PCB 上安装了一个额外的温度传感器，用于测量参考设计外壳内的环境温度。该温度传感器包含一个 10kΩ NTC 表面贴装热敏电阻和一个构成分压器的固定电阻器。随着温度升高，分压器中点处的电压也会升高。该电压经过低通滤波，以消除缓慢变化的温度中的任何高频噪声。可通过以下公式来实现该电压信号 V_T 与热敏电阻温度 (以开尔文为单位) 之间的转换：

$$T = \left(\frac{\ln(3.3/V_T - 1)}{3900} + \frac{1}{298.15} \right)^{-1} \quad (5)$$

3.1.1.7 层压总线和直流总线电容器

模块电源端子的垂直偏移使汇流条设计能够保持简单且具有成本效益，同时保持低电源环路电感。低电感汇流条用于将直流链路电容器 (位于汇流条下方) 与电源模块互连。同样，偏移电源模块端子使汇流条组件没有弯曲或支架，从而降低成本并尽可能地增大重叠。电容器应尽可能靠近放置，更大程度地减小总环路面积。如图 3-11 所示，busbar 包含一个连接模块和电容器 V+ 端子并后跟绝缘体的平板，以及另一个连接模块和电容器凸起的 V- 端子的平板 (具有用于电容器端子的压印或垫片)。该结构足够简单，可以使用极少的制造工艺进行生产，从而降低成本并缩短交货时间。

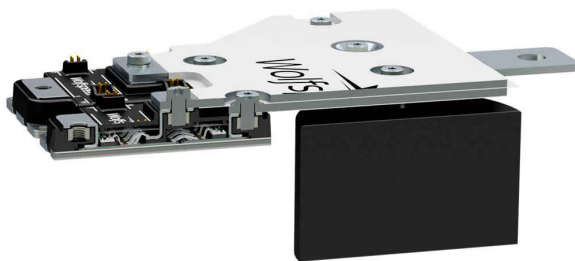


图 3-11. 显示电源环路的层压汇流条结构横截面视图

电容器的优化方向是通过测量制作成双层 PCB 的总线几何形状的三个原型电感来确定的。在每个原型之间，电容器端子垂直、水平和对角旋转 45 度。水平方向在安装电容器的情况下提供最低的相对电感，是用于层压总线的方向。

薄膜电容器有两个用途：闭合高频电源环路和提供本地能量存储。为了发挥这些作用，总线电容器必须具有低电感和高纹波电流额定值。该参考设计具有三个 Fischer & Tausche® CX100 μ 1100d51KF6 电容器，每个电容器具有 100A 的额定纹波电流和 100 μ F 的额定电容。1100V 的额定电压足以在 900V 的最大直流总线上运行，并允许来自激进开关速率的峰值过冲。每个电容器具有 10.5nH 的等效串联电感 (ESL)。拥有三个这样的电容器可将电容器组的总 ESL 降低至 3.5nH，直流总线和电容器的总测得电感为 5.3nH，这意味着总线本身贡献了 1.8nH。对于 XM3 模块，直流总线的电感为 5.3nH，电源环路电感为 6.7nH，因此组合电源环路电感为 12nH，低于许多标准封装模块单独的杂散电感。

3.1.1.7.1 放电 PCB

由于直流总线电容器中可能存储大量能量，因此需要使用放电电阻器以在合理的时间内使直流总线达到安全电压。放电 PCB 安装在其中一个直流总线电容器的 V+ 和 V- 端子上，除了用于在控制器上进行直流总线电压检测测量的板对板连接器外，还具有高功率表面贴装电阻器。这些电阻器的大小经过设定，可在一分钟内将总线从 800V 标称电压放电至 50V 以下。这要求电阻器网络在 9 个电阻器上消耗最大 9.4W 的功率，其工作电压额定值为 1500V。

3.2 测试设置

3.2.1 软件设置

如果尚未安装构建和运行工程所需的 [Code Composer Studio \(CCS\)](#)，请下载并安装该工具。建议为该工程使用 CCS 版本 12.2.0 或更高版本。[CCS 用户指南](#)提供了有关 CCS 安装和使用的更多详细信息。

TIDM-02014 的软件作为 [C2000Ware MotorControl SDK](#) 的一部分提供。请注意，C2000Ware MotorControl SDK 安装与 CCS 安装是分开的。安装 SDK 后，请使用以下指南在 CCS 中导入和运行该工程。

3.2.1.1 Code Composer Studio 工程

要将 TIDM-02014 的软件工程导入 CCS，请点击 **Project** → **Import CCS Projects**，然后浏览至 <SDK install location>\designs\tidm_02014\<device>\ccs 并点击 **Select Folder**。选择名为 *tidm_02014_<device>* 的工程，然后点击 **Finish**。现在，该工程显示在 CCS 的 **Project Explorer** 窗格中。用户指南提供了有关 [将工程导入 CCS](#) 的更多详细信息。

src_foc 文件夹包含典型的 FOC 模块，包括 Park 和 Clarke 变换、PID 函数和估算器。这些模块独立于特定器件和电路板，还可用于 SDK 中的多种其他设计。

src_control 文件夹包含电机驱动控制文件，这些文件在中断服务例程和后台任务中调用电机控制核心算法函数。*src_sys* 文件夹包含为其他系统功能保留的一些文件，例如 CAN 通信的驱动程序。用户可以添加自己的用于系统控制、通信等功能的代码。这些模块专用于此参考设计工程，但与器件和电路板无关。

特定于电路板、特定于电机和特定于器件的文件位于 *src_board* 文件夹中。这些文件包含特定于器件的驱动程序，用于运行设计。如果要将工程迁移到您自己的电路板或其他器件，只需根据器件或电路板的引脚分配和功能更改 *hal.c*、*hal.syscfg* (或 *hal_dclinkss.syscfg*，如果需要)、*hal.h* 和 *user_mtr1.h* 文件。

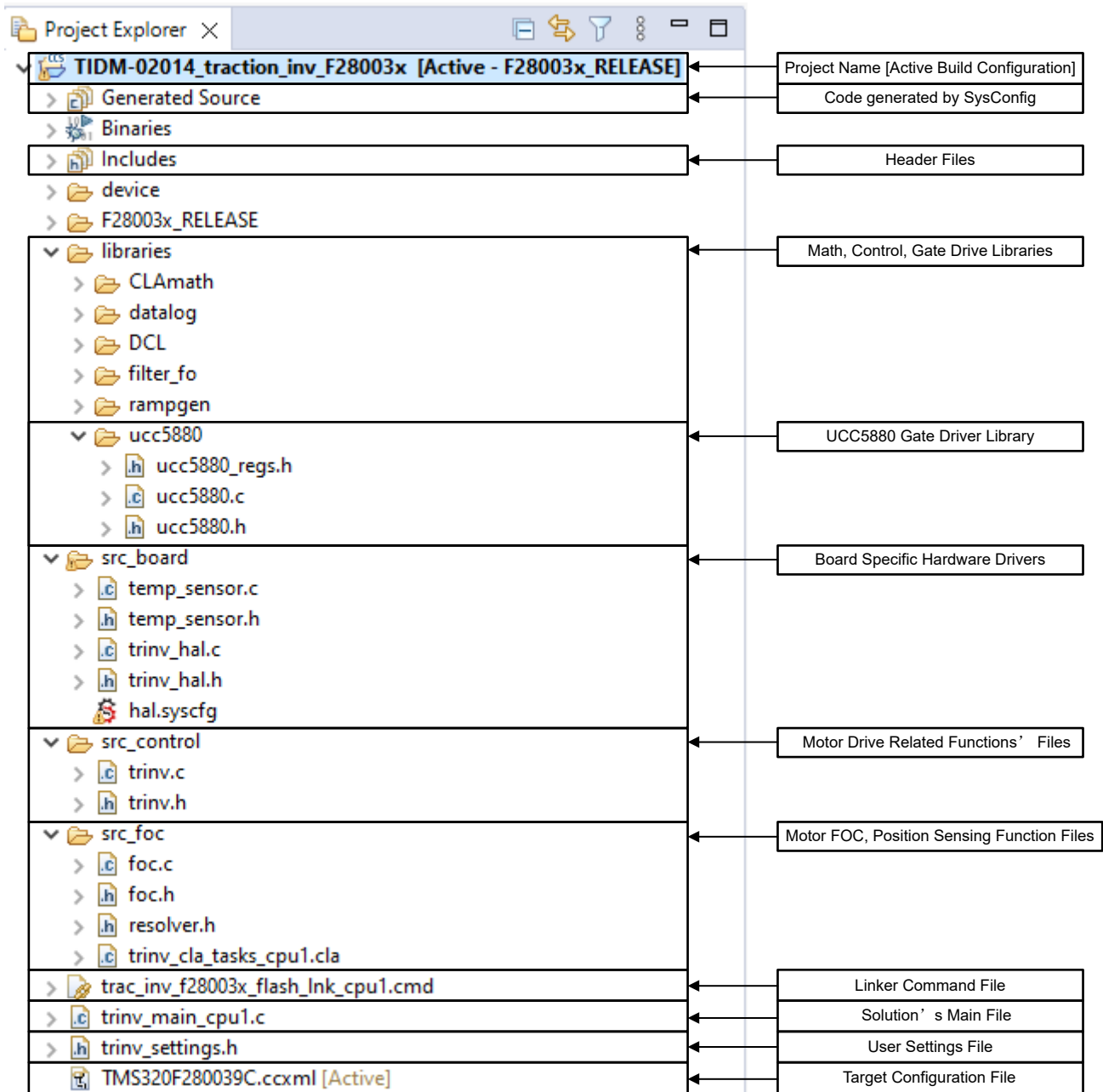


图 3-12. 参考工程的 Project Explorer 视图

tidm_02014 工程的默认构建配置名为 *F28003x_RELEASE*，使用 *hal.syscfg* 文件配置 ePWM、CMPSS 和 ADC 外设以及 GPIO。该工程的预定义符号包括单分流器电流重建库文件和函数调用（作为构建的一部分）。

可以通过右键点击该工程并转至 **Build Configurations** → **Manage** 来修改默认构建配置。用户可以为不同的测试用例添加或修改构建配置。

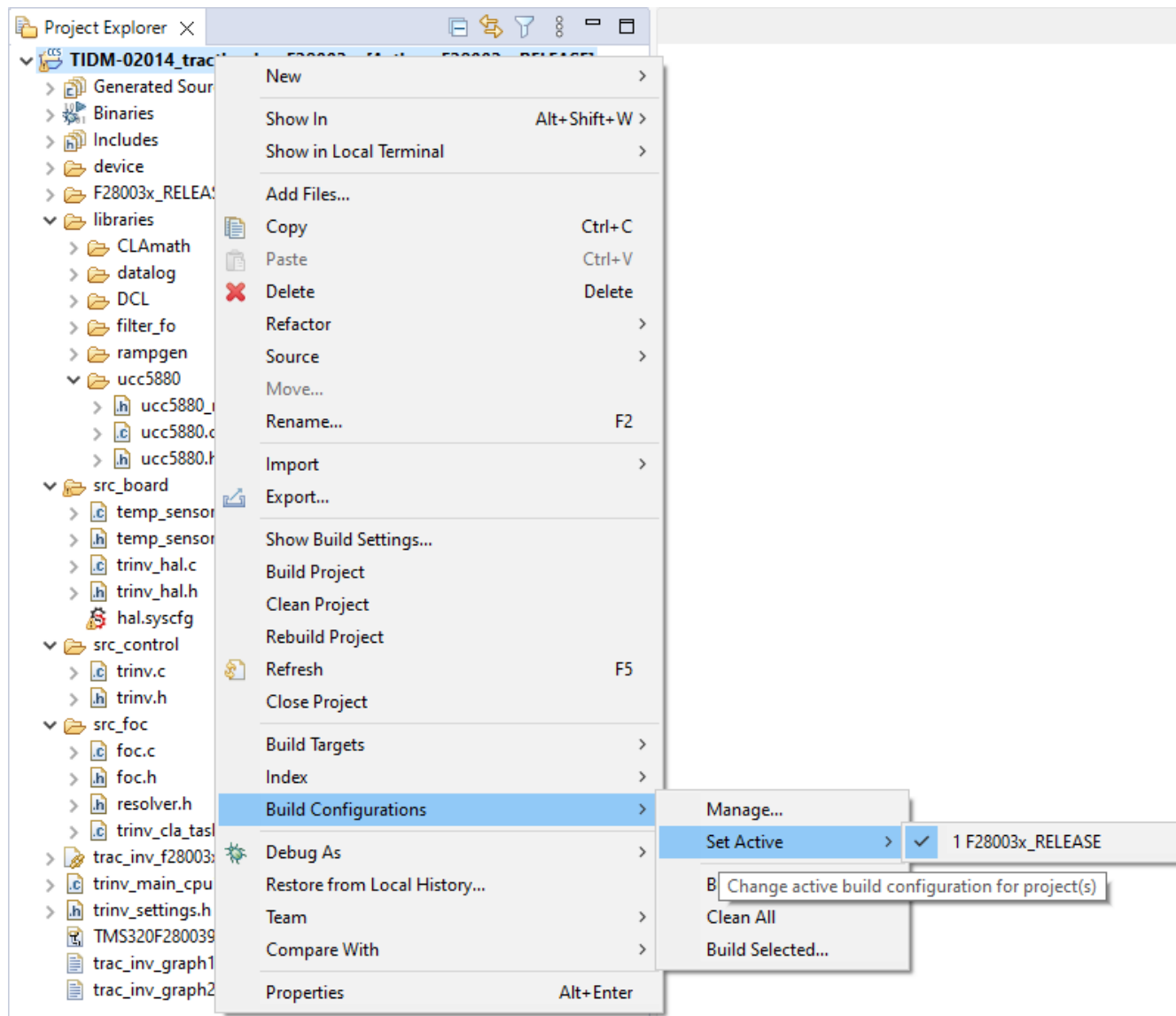


图 3-13. 选择活动构建配置

可以使用工程属性中的预定义符号来启用或禁用系统的不同运行模式。选项如下：

- **CLOSED_CURRENT_LOOP**，用于启用 d 轴和 q 轴电机电流的闭环控制。
- **CLOSED_SPEED_LOOP**，用于启用闭环速度控制。

将这些符号添加到预定义符号列表可启用相应的功能。要查看和编辑预定义符号，请右键单击工程并选择 **Properties**。然后转至 **C2000 Compiler** 选项的 **Predefined Symbols** 部分，如图 3-14 所示。默认情况下，上述符号在预定义符号列表中定义，相应的功能会启用。

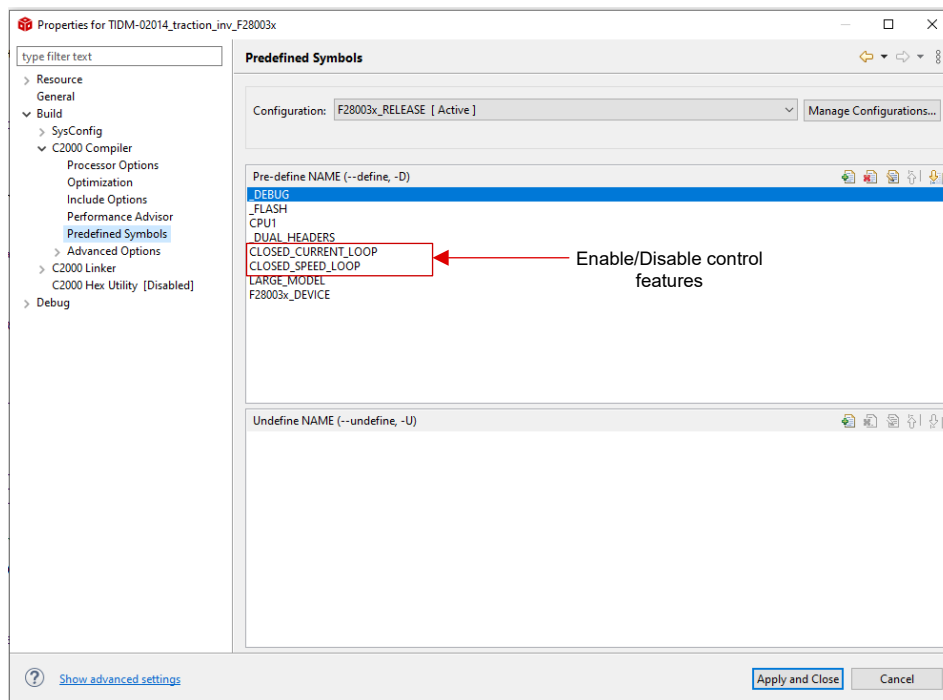


图 3-14. 在工程属性中选择预定义符号

3.2.1.2 软件结构

图 3-15 中显示了工程的总体结构。器件外设配置基于 C2000Ware Driverlib，部分使用 SysConfig 生成，使代码可跨硬件和器件移植。要将参考设计软件移植到不同的电路板或器件，用户只需更改 *trinv_hal.c*、*trinv_hal.syscfg* 和 *trinv_hal.h* 文件以及 *trinv_settings.h* 中的参数。

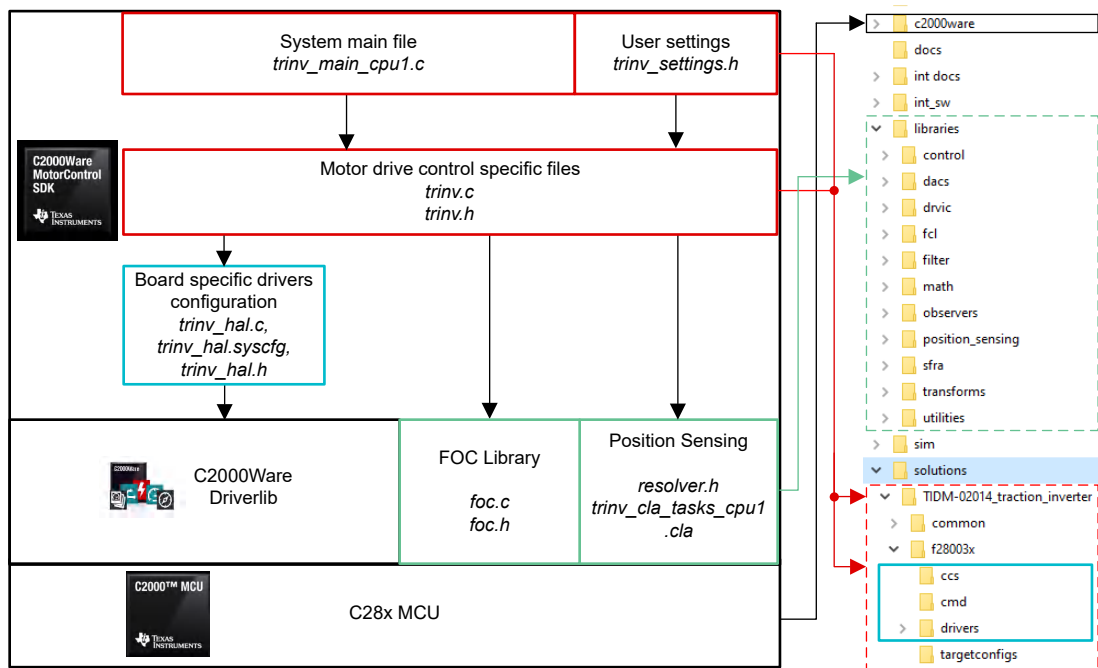


图 3-15. 工程结构概览

图 3-16 展示了固件的工程软件流程图，其中包括一个用于实时电机控制的 ISR、一个允许用户通过调试窗口更新电机控制参数的主循环。ISR 由 ADC 转换结束 (EOC) 触发。在主 ISR 中运行的函数在 *trinv.h* 头文件中定义。此

外，在该设计中，通过旋转变压器接口来检测准确的电机位置。读取解析器信号的 ADC 值并执行相应位置、速度计算的函数在作为独立处理内核的控制律加速器 (CLA) 中运行。该函数在 *trinv_cla_tasks_cpu1.cla* 文件中定义。

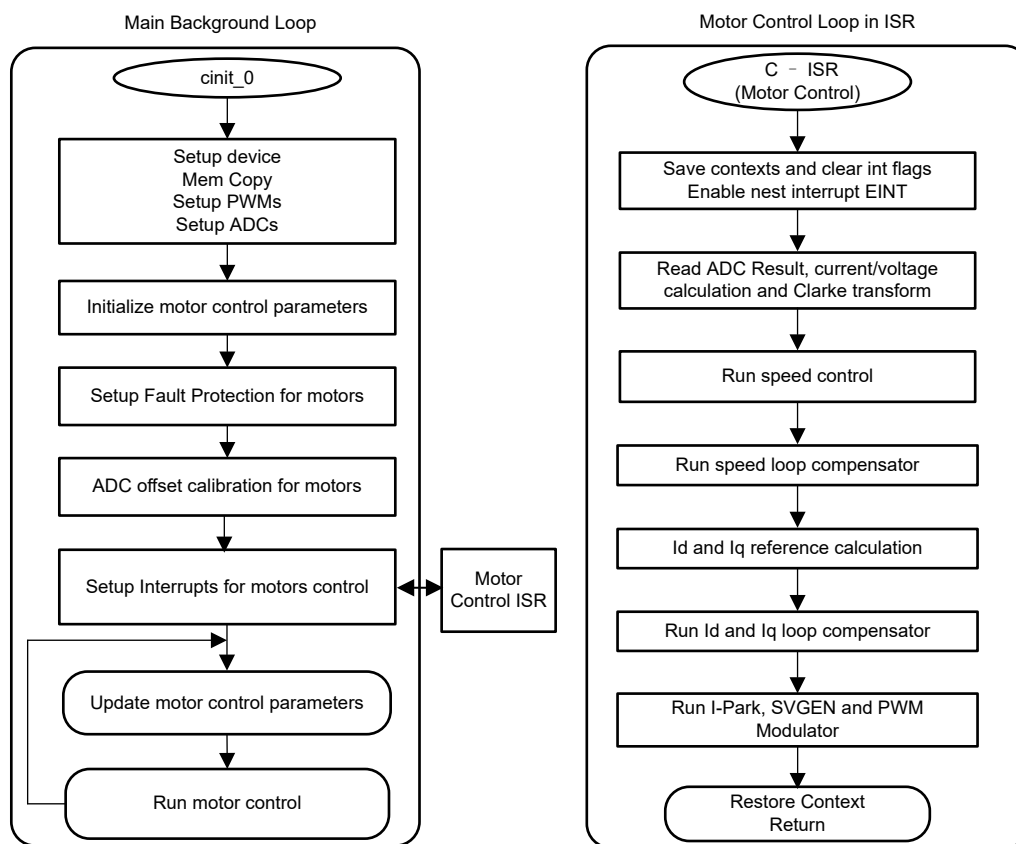


图 3-16. 后台软件和电机控制 ISR 流程图

3.3 测试步骤

电机控制软件可以针对不同的测试模式进行配置，以实现增量软件测试。例如，如果既未定义 **CLOSED_CURRENT_LOOP** 符号，也未定义 **CLOSED_SPEED_LOOP** 符号，则 V_d 和 V_q 基准值直接被设置为默认测试值。该模式可用于测试 PWM 设置和开环逆变器运行。同样，如果仅定义 **CLOSED_CURRENT_LOOP**，而不定义 **CLOSED_SPEED_LOOP**，则可以直接设置 i_d 、 i_q 基准。在这种情况下，可以通过设置斜坡发生器频率来设置电机转速。

trinv_setting.h 文件中提供了用户电机类型和相应的参数。可以通过更改 **USER_MOTOR** 宏的值来更改默认设置。如果用户打算使用预定义电机列表之外的电机，则用户可以复制使用的模板。

3.3.1 工程设置

将工程导入 CCS，并选择适当的构建配置。右键点击 **Project Explorer** 内的工程并选择 **Rebuild Project**。确认 **Console** 窗格显示工程构建时没有任何错误。

成功完成构建后，选中 *tidm_02014* 工程，转至 **Run → Debug**，或点击工具栏上的 **Debug** 按钮。工程默认情况下将使用工程中的 *TMS320F280039C.ccxml* 文件启动调试会话。*TMS320F280039C.ccxml* 配置为使用 TMDSCNCD280039C controlCARD 电路板上的德州仪器 (TI) XDS110 USB 调试探针。

点击 **Debug** 后，CCS 将自动连接至目标，将输出文件载入器件内并更改为 **CCS Debug** 视图。程序应该在 *main()* 的开始处暂停。

如果 **Expressions** 窗格尚未打开，请点击 CCS 菜单栏中的 **View → Expressions**。您可以手动添加变量、也可以导入与此构建级别关联的推荐变量列表，方法是在 **Expressions** 窗口中右键点击并选择 **Import...**，并找到文件

<SDK install location>\solutions\tidm_02014\common\debug\tidm_02014.txt。点击 **OK**，窗口中将填充变量。

点击“Expressions”窗口工具栏中的 **Continuous Refresh** 按钮，告知 CCS 以 CCS 调试首选项中定义的速率持续更新数据。

3.3.2 运行应用程序

转至 **Run → Resume** 或点击工具栏中的 **Resume** 按钮来运行代码。该工程现在可以运行并且变量显示在“Expressions”窗口中。检查以下各项，确认应用和硬件设置能够正常工作：

- 栅极驱动器板上的绿色电源 LED 必须亮起。如果栅极驱动器在无故障的情况下初始化，则红色 nFault LED 均不会亮起。可以通过 `tripFlagDMC.fault.UCC5880_status` 变量检查栅极驱动器初始化状态。
- 类似地，`tripFlagDMC` 结构中的其他变量显示其他故障的状态。如果未设置故障标志，那么要运行测试电机，可以将 `runMotor` 设置为 `RUN_MOTOR`。您的变量需要看起来类似于图 3-17 中所示的内容。
- 如果未检测到故障，则 `motor1.isrCount` 必须持续递增。
- 检查电机逆变器板的校准偏移。电机相电流检测值的偏移值必须大约等于 ADC 满量程电流的一半。
- 也可以使用示波器探测电机驱动器的 PWM 输出。

Expression	Type	Value	Address
(*) runMotor	enum <unnamed>	MOTOR_RUN	0x0000F887@Data
(*) speedRef	float	0.5	0x0000F844@Data
(*) tripFlagDMC.fault.UCC5880_status	enum <unnamed>	ALL_GOOD	0x0000B156@Data
(*) IqRef	float	0.100000001	0x0000F85C@Data
(*) motor1.dcBus_V	float	21.0616417	0x0000B058@Data
> tripFlagDMC	union <unnamed>	{all=0,fault={UCC5880_status=A...	0x0000B156@Data
> motor1	struct_Motor_t_	{Ls_d=0.000198548049,Ls_q=0.00...	0x0000B040@Data
(*) IdRef	float	0.0	0x0000F85A@Data
(*) posFdbk	unsigned int	1	0x0000F840@Data
(*) motor1.omega_e	float	17.3629017	0x0000B066@Data
(*) motor1.theta_e	float	1.67985952	0x0000B064@Data

图 3-17. 通过“Expressions”视图进行运行时控制和调试

您可以首先点击工具栏上的 **Suspend** 按钮或选择 **Target → Suspend** 来暂停 CPU。要从头开始重新运行应用，请点击 **CPU Reset** 工具栏按钮或点击 **Run → Reset → CPU Reset**，然后点击 **Restart** 按钮或 **Run → Restart** 来重置控制器。您可以点击 **Terminate** 按钮，或点击 **Run → Terminate** 来关闭 CCS 调试会话。程序将暂停，并断开 CCS 与控制器的连接。

请注意，每次更改代码时无需终止调试会话。您可以转到 **Run → Load → Load Program...**（如果是同一个文件，请选择 **Reload Program...**）。如果 CCS 检测到您已重建可执行文件，还会自动进行提示，询问您是否需要重新加载该可执行文件。

3.4 测试结果

本节介绍了对系统元件执行的测试结果。本节提供了栅极驱动器和辅助电源的结果，然后介绍了完整的逆变器系统。

3.4.1 隔离式偏置电源

UCC14240-Q1 的启动行为经过验证，如图 3-18 所示。

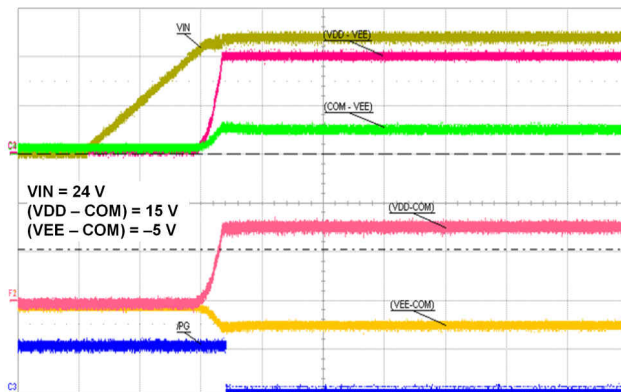


图 3-18. UCC14240-Q1 上电序列

执行负载调节测试以验证 UCC14240-Q1 的稳定性。在 VEE 和 VCC 之间连接了电子负载，负载阶跃为 0 至 80mA。表 3-5 展示了测得的输出电压。

表 3-5. UCC14240-Q1 负载调节

负载 (mA)	V _{out} (V)	功率 (W)
10	18.853	0.188
20	18.848	0.377
30	18.84	0.565
40	18.834	0.753
50	18.83	0.941
60	18.828	1.13
69	18.825	1.3
80	18.819	1.505

标称电压值为 19V，用于计算负载调节的公式为：

$$\text{Load regulation} = \left(\frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{nom}}} \right) \times 100 = 0.18\% \quad (6)$$

3.4.2 隔离式栅极驱动器

在 800V 下进行双脉冲测试，以评估不同可调栅极驱动强度的开关行为。以下结果展示了弱驱动 (5A) 和强驱动 (15A) 之间的差异。下图展示了栅源电压、漏源电压和漏极电流的波形。关断能量在第一个脉冲结束时测量，而开启能量在第二个脉冲开始时测量。图 3-19 展示了测量结果。

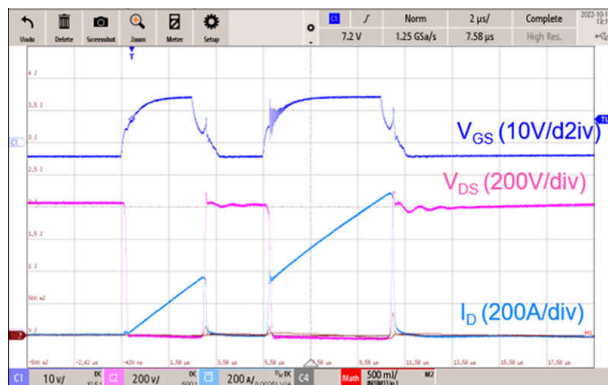


图 3-19. 弱驱动强度下的双脉冲测试

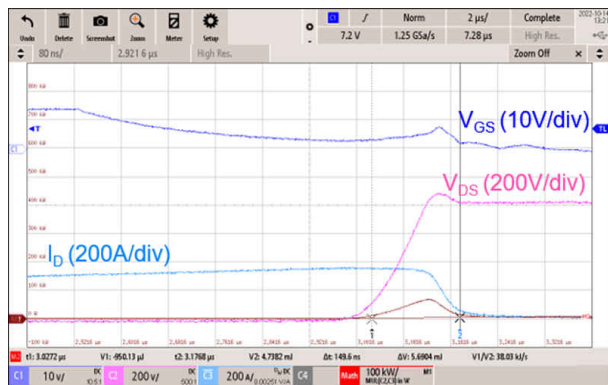


图 3-20. 弱驱动强度下的关断波形

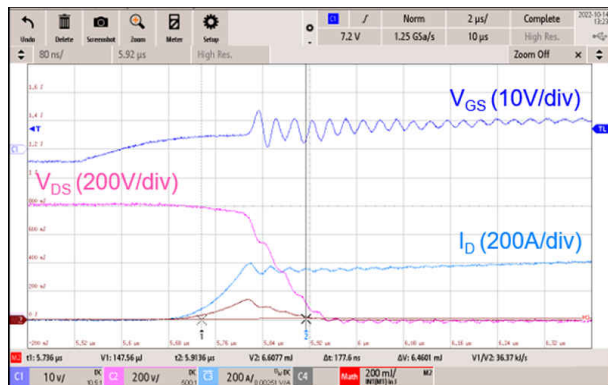


图 3-21. 弱驱动强度下的开启波形

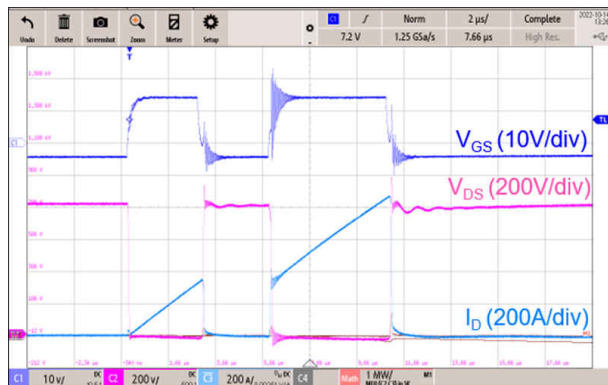


图 3-22. 强驱动强度下的双脉冲测试

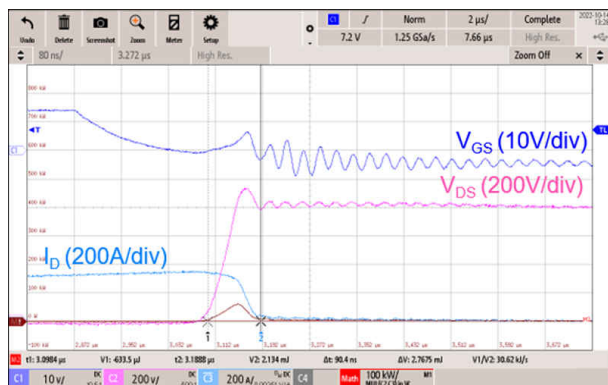


图 3-23. 强驱动强度下的关断波形

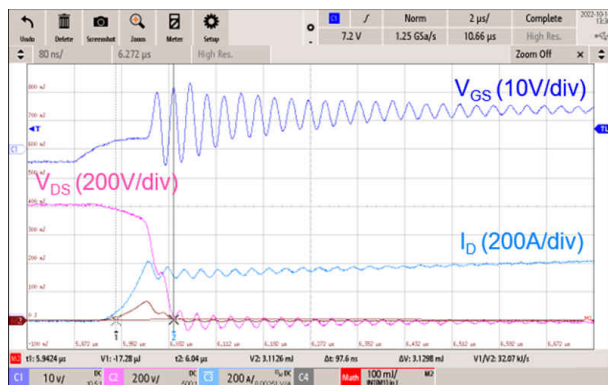


图 3-24. 强驱动强度下的开启波形

表 3-6. 开关能量测量

	弱驱动 (5A)	强驱动 (15A)
关断能量	5.65 mJ	2.77 mJ
导通能量	6.46 mJ	3.13 mJ

3.4.3 逆变器系统

使用感性负载在额定电压和功率水平下对牵引逆变器系统进行了测试。改变了 UCC5880-Q1 栅极驱动器的驱动强度以研究其对系统效率的影响。下图展示了 SiC MOSFET 漏源电压 (V_{ds}) 和相电流的示波器图。图 3-25 和图 3-27 分别展示了弱栅极驱动强度和强栅极驱动强度下的测试波形。表 3-7 展示了测试条件和获得的功率结果。在感性负载测试中，负载功率会进行循环。因此，外部直流电源仅提供系统损耗，该损耗量化为 P_{loss} 。可以看出，随着驱动强度的提高，系统损耗也会降低。这主要是由于开关损耗的降低。但是，如图 3-27 所示，较高的驱动强度也会增加 SiC MOSFET 上的漏源电压过冲。利用 UCC5880-Q1 栅极驱动器的可变驱动强度特性，可以实时优化系统损耗。

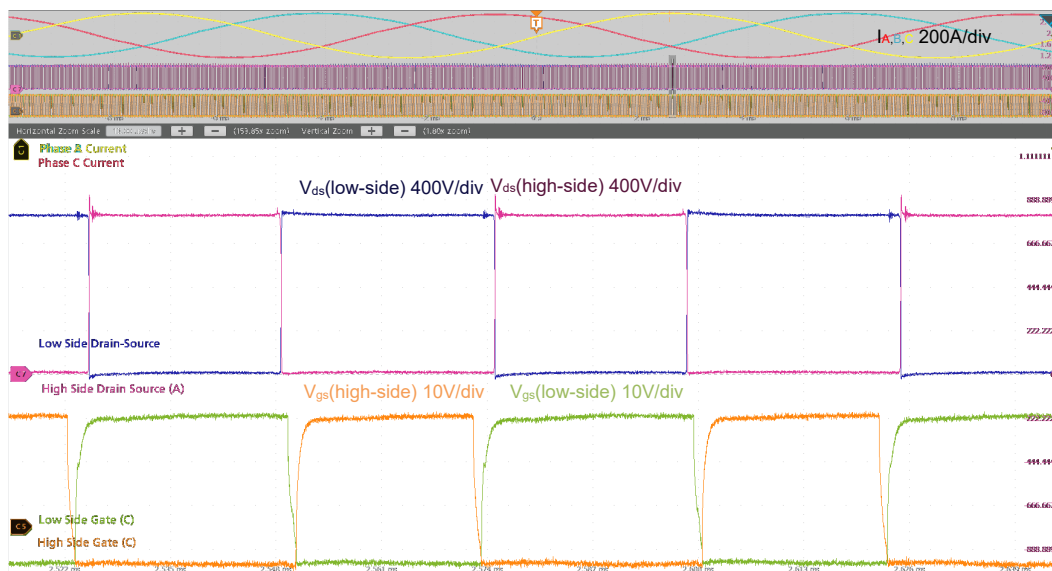


图 3-25. 弱栅极驱动强度下的电压和相电流波形 ($I_{RMS} = 285A$)

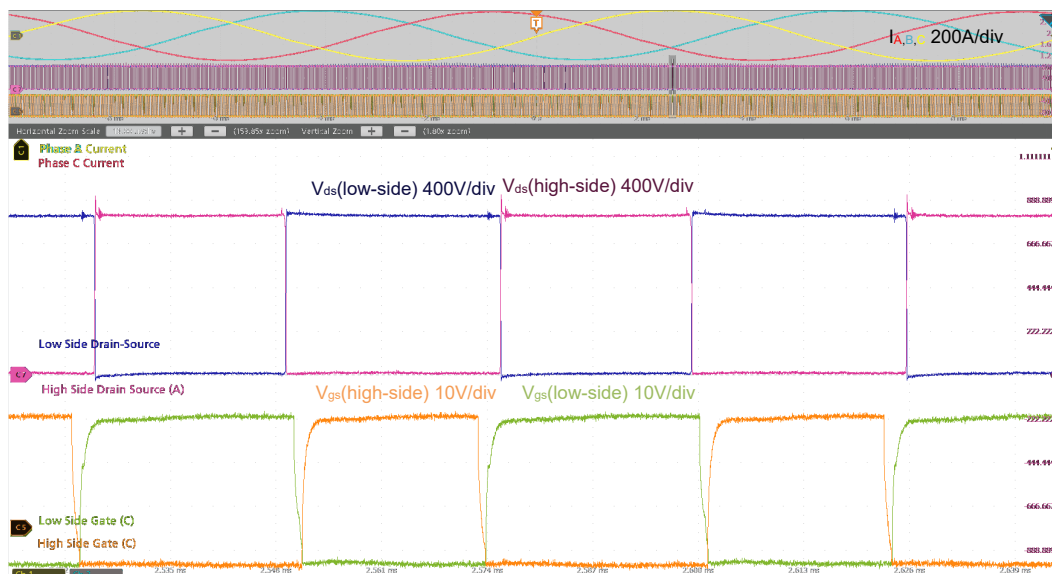


图 3-26. 弱栅极驱动强度下的电压和相电流波形 ($I_{RMS} = 320A$)

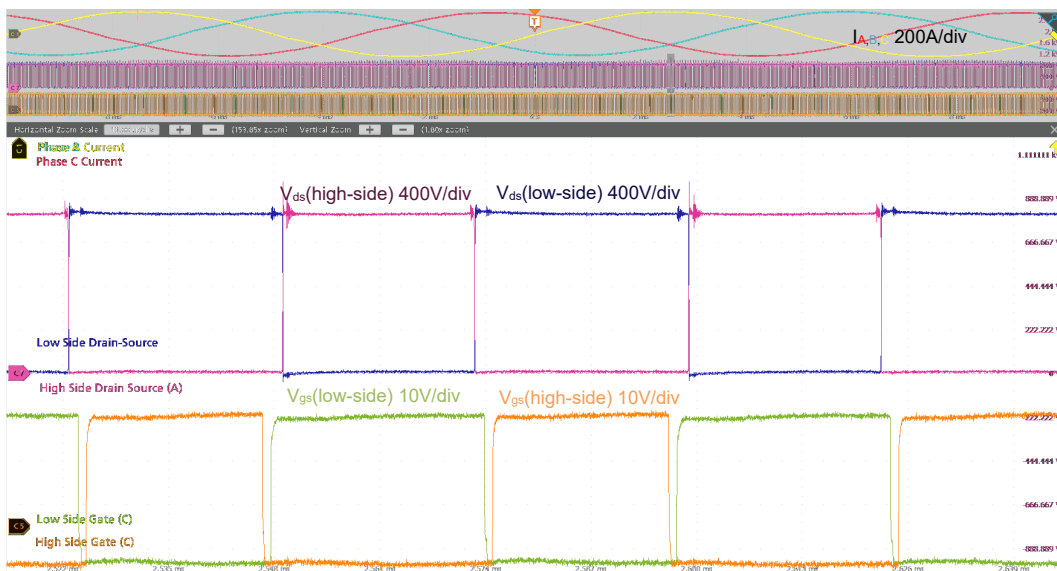


图 3-27. 强栅极驱动强度下的电压和相电流波形 ($I_{RMS} = 285A$)

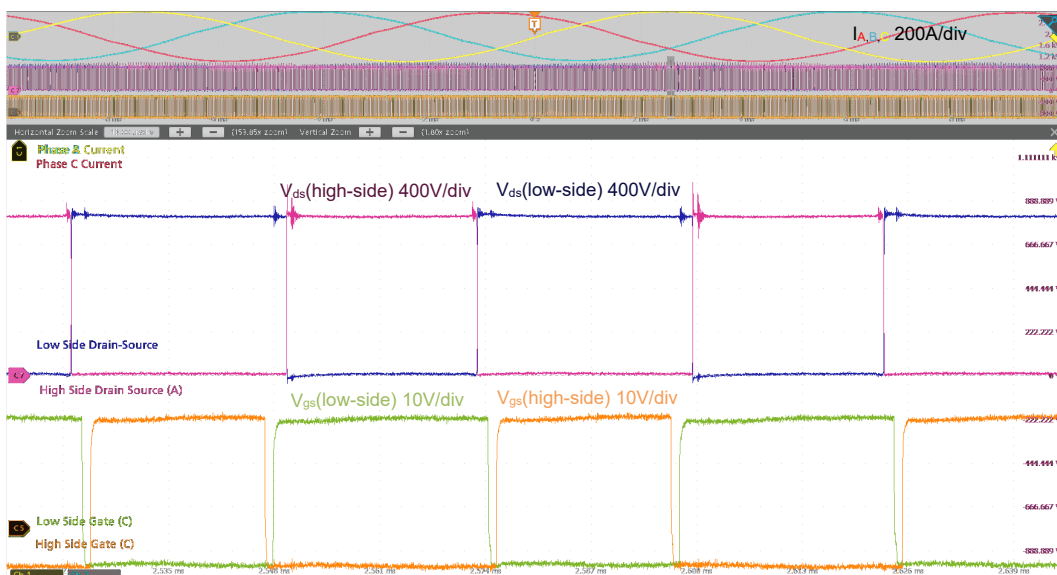


图 3-28. 强栅极驱动强度下的电压和相电流波形 ($I_{RMS} = 320A$)

表 3-7. 测试条件和结果

栅极驱动强度	直流总线电压	RMS 电流	P_{loss}
弱	800V	285 A	4.211kW
弱	800V	320 A	5.162kW
强	800V	285 A	2.273kW
强	800V	320 A	2.747kW

4 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元件。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。有关更多信息，请联系 TI 的[产品信息中心](#)。

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

- 保持工作区整洁有序。
- 每次电路通电时，必须有合格的观察员在场监督。
- 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，指示可能存在高压作业，以避免意外接触。
- 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。
- 使用稳定且不导电的工作台。
- 使用绝对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。

- 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。
- 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。
- EVM 准备就绪后，根据需要将 EVM 通电。

WARNING

EVM 通电后，请勿触摸 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

- 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。

5 设计和文档支持

5.1 设计文件

5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDM-2014](#) 中的设计文件。

5.1.2 材料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDM-2014](#) 中的设计文件。

5.1.3 PCB 布局建议

5.1.3.1 布局图

要下载每个板的布局图，请参阅 [TIDM-2014](#) 中的设计文件。

5.1.4 Altium 项目

要下载各个板的 Altium 工程文件，请参阅 [TIDM-2014](#) 中的设计文件。

5.1.5 Gerber 文件

要下载各个板的光绘文件，请参阅 [TIDM-2014](#) 中的设计文件。

5.1.6 装配图

要下载各个板的装配图，请参阅 [TIDM-2014](#) 中的设计文件。

5.2 工具与软件

工具

- [TMDSCNCD280039C](#) TMS320F280039C 评估模块 controlCARD 是一款适用于 F28003x 器件系列的低成本评估和开发板。TMS320F280039C 用作该设计的子卡，通过标准 180 引脚 controlCARD HSEC 接口连接到参考电路板。
- [TMDSCNCD263](#) TMDSCNCD263 是一款基于 HSEC180 controlCARD 的评估和开发工具，适用于 AM263x 系列 Sitara™ 高性能微控制器。该板提供易于使用的标准化平台来开发下一个应用，适用于初始评估和原型设计。

软件

- [C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK](#) MotorControl SDK 是一套软件、工具和文档，专为基于 C2000 实时控制器的电机控制系统开发而设计。
- [MCU-PLUS-SDK-AM263X](#) AM263x 微控制器 (MCU) 再加上软件开发套件 (SDK) 共同构成一个面向嵌入式处理器的统一软件平台，此平台设置简单，可提供开箱即用的示例、基准测试和演示。

5.3 文档支持

1. Mouser，[适用于混合动力汽车和电动汽车的简便 1B/2B 汽车电源模块](#) 产品简介。
2. 德州仪器 (TI)，[用于单 IGBT 驱动器偏置的双路隔离输出 Fly-Buck 电源模块参考设计](#) 设计文件夹。
3. Würth Electronics，[规格表：750315445](#)。
4. 德州仪器 (TI)，[使用 TPS54160-Q1 通过 CISPR25 辐射发射测试](#) 应用手册。
5. 德州仪器 (TI)，[TPS54xx0-Q1 和 TPS57xx0-Q1 设计计算工具](#)。
6. Würth Electronics，[规格表：760390014](#)。

5.4 支持资源

[TI E2E™ 支持论坛](#)是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题可获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的《[使用条款](#)》。

5.5 商标

TI E2E™, Sitara™, and C2000™ are trademarks of Texas Instruments.

EconoDUAL™ is a trademark of Infineon Technologies Ag.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

EtherCAT® is a registered trademark of Beckhoff Automation GmbH.

Simple Switcher® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 术语

AFE - 模拟前端

NTC - 负温度系数热敏电阻

LDO - 低压降稳压器

UVLO - 欠压锁定

TVS - 瞬态电压抑制

CMTI - 共模瞬态抗扰度

DESAT - 去饱和

IGBT - 绝缘栅双极晶体管

MOSFET - 金属氧化物半导体场效应晶体管

PWM - 脉宽调制

SiC - 碳化硅

MCU - 微控制器单元

BJT - 双极结晶体管

PCB - 印刷电路板

RPM - 每分钟转数

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