

经过 ASIL D 等级功能安全认证的高速牵引和双向直流/直流转换参考设计



说明

此参考设计演示了如何通过一个 TMS320F28388D C2000™ 实时 MCU 来控制混合动力汽车/电动汽车牵引逆变器和双向直流/直流转换器。牵引控制利用基于软件的旋转变压器数字转换器 (RDC)，使电机转速高达 20,000RPM。直流/直流转换器采用峰值电流模式控制 (PCMC) 技术。该系统基于 ASIL 分解的功能安全概念已通过 TÜV SÜD 认证，说明整个系统的安全完整性等级可达 ISO 26262 ASIL D 等级，符合典型的安全目标。

资源

TIDM-02009	设计文件夹
TMS320F28388D 、 UCC5870-Q1	产品文件夹
AMC1302-Q1 、 AMC1311-Q1	产品文件夹
TMS570LS1227 、 TCAN4550-Q1	产品文件夹
C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK	工具文件夹

特性

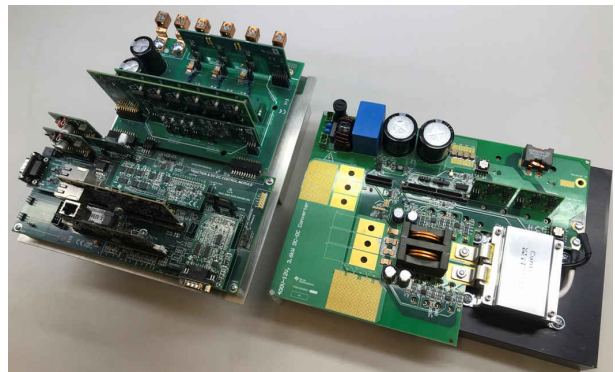
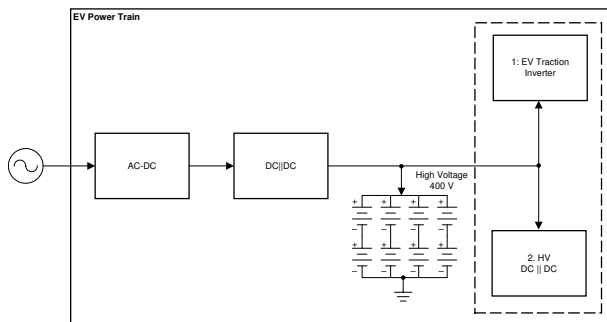
- 具有 SiC 功率级的电动汽车牵引逆变器可高速运行 (转速高达 20,000RPM)
- 具有 SiC 初级 FET 的双向高压至低压相移全桥 (PSFB) 直流/直流转换器
- 基于软件的旋转变压器数字转换器 (RDC) 支持电机高速运行
- 使用一个 TMS320F28388D 对牵引逆变器和直流/直流转换器进行集成控制
- 基于 ASIL 分解的功能安全概念经 TUV SUD 认证符合 ASIL D 等级
- 峰值电流模式控制 (PCMC)，无需外部支持电路即可实现 PCMC 功能，并采用同步整流 (SR) 切换机制

应用

- 逆变器和电机控制
- 直流/直流转换器



咨询我们的 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

动力总成系统是电动汽车的核心部件，如图 1-1 所示。该系统主要包含车载充电器 (OBC)、牵引逆变器、高压 (HV) 转低压 (LV) 直流/直流转换器三个子模块。目前业界的趋势是将 OBC、牵引逆变器和直流/直流子系统集成到更少的外壳中，并用较少的 MCU 来控制它们，从而降低系统成本和复杂性。这种情况将要求 MCU 具有较高的实时控制性能。在此参考设计中，牵引逆变器和双向直流/直流转换器由一个 C2000™ TMS320F28388D 微控制器进行控制。当该直流/直流转换器被设置为双向时，可用于对牵引逆变器系统中的直流总线电容器进行预充电，这样就可以省去限流继电器和电阻，从而降低系统成本。

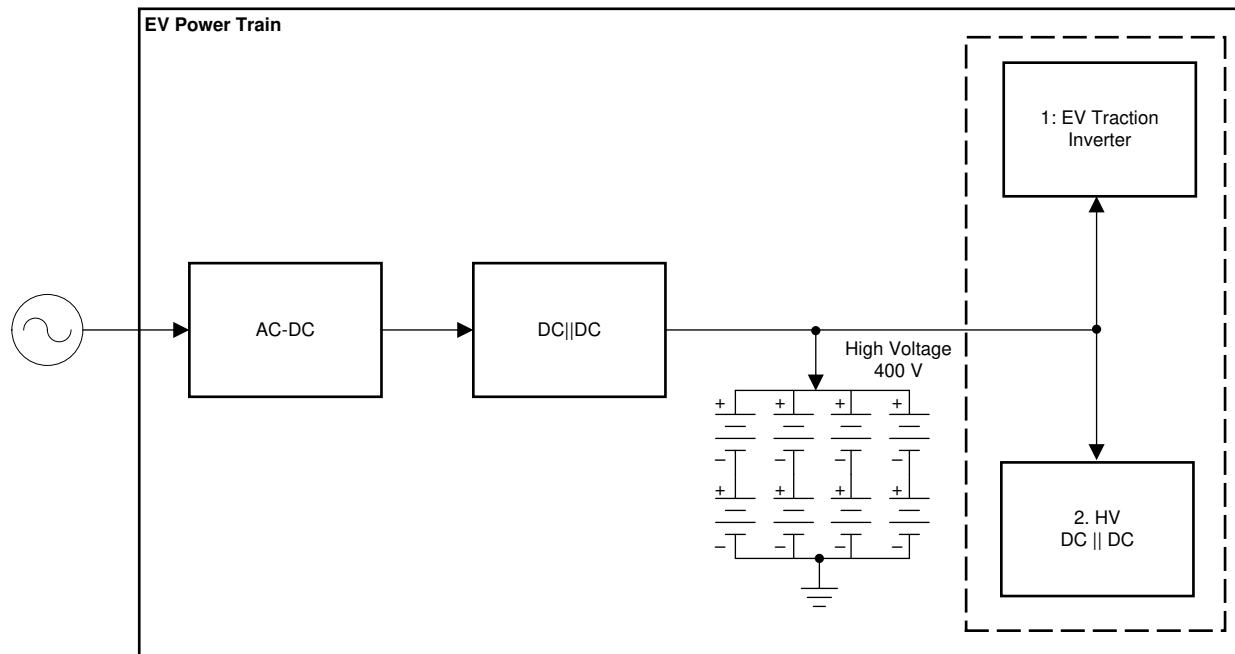


图 1-1. 电动汽车动力总成系统

图 1-2 显示了牵引逆变器系统的简要方框图。此参考中包括用于接收扭矩命令的 CAN FD 接口、具有隔离式检测功能的 SiC 逆变器功率级以及用于位置反馈的旋转变压器数字转换器系统。

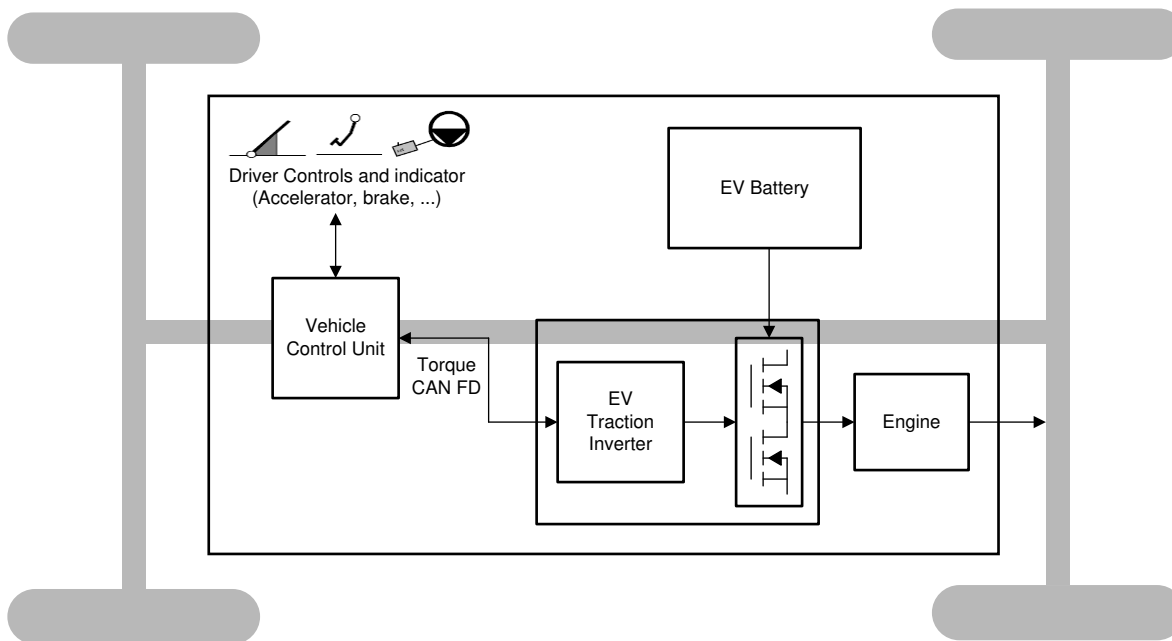


图 1-2. 电动汽车牵引系统

双向直流/直流转换器的方框图如图 1-3 所示。这是一个具有同步整流功能的移相全桥 (PSFB) 转换器。此参考设计中实现了全桥的一个桥臂中开关的 ZVS 和另一桥臂中开关的零电压或低电压开关。此设计在次级侧用不同的切换方案来执行电流倍增器同步整流，以便在变化的负载条件下实现出色性能。

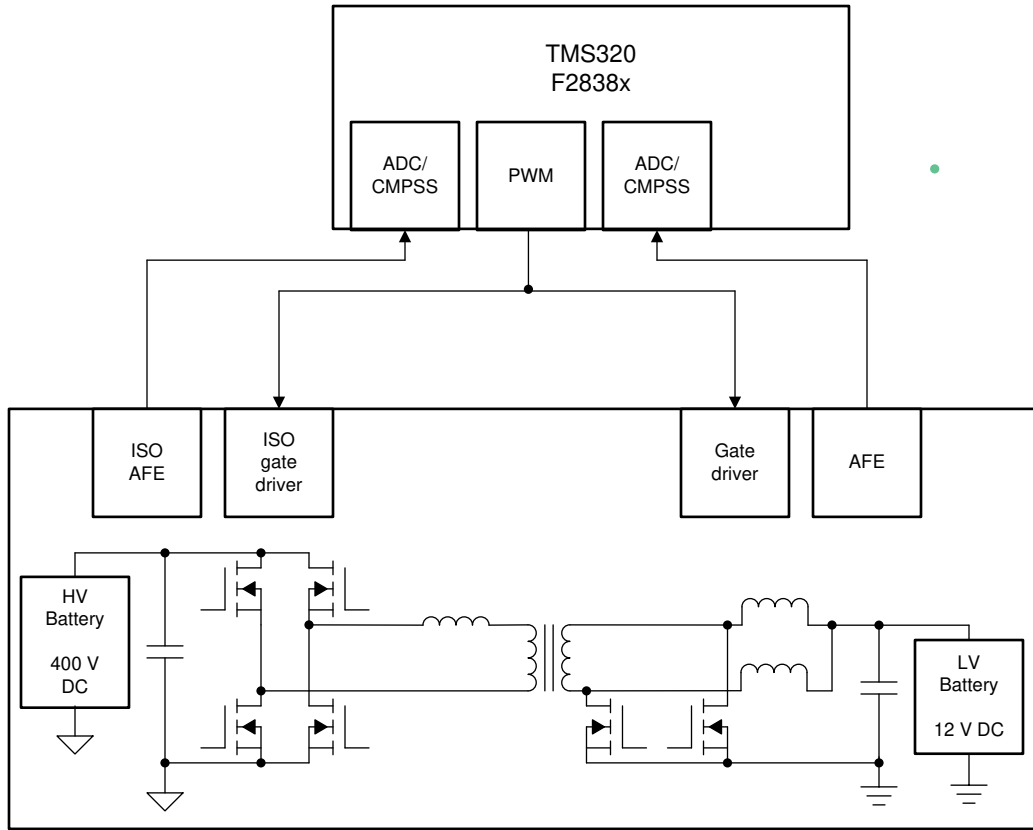


图 1-3. 直流/直流系统方框图



WARNING

TI 建议，该参考设计仅在**实验室环境中运行**，不可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。

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，则将可能导致电击、火灾或伤害。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。

高电压！ 电路板中存在可接触的高电压。可能发生电击。如电路板的电压和电流处理不当，则可能会导致电击、火灾或伤害。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。为安全起见，强烈建议使用具有过压和过流保护功能的隔离式测试设备。

TI 认为在对电路板通电或进行仿真之前，用户有责任确认其已明确并理解电压和隔离要求。通电后，请勿触摸该设计或与该设计相连的元件。

表面高温！ 接触可能会导致烫伤。请勿触摸！

电路板加电后，某些元件可能会达到 55°C 以上的高温。在运行过程中或运行刚结束时，用户不得触摸电路板，因为可能存在高温。

2 系统概述

2.1 方框图

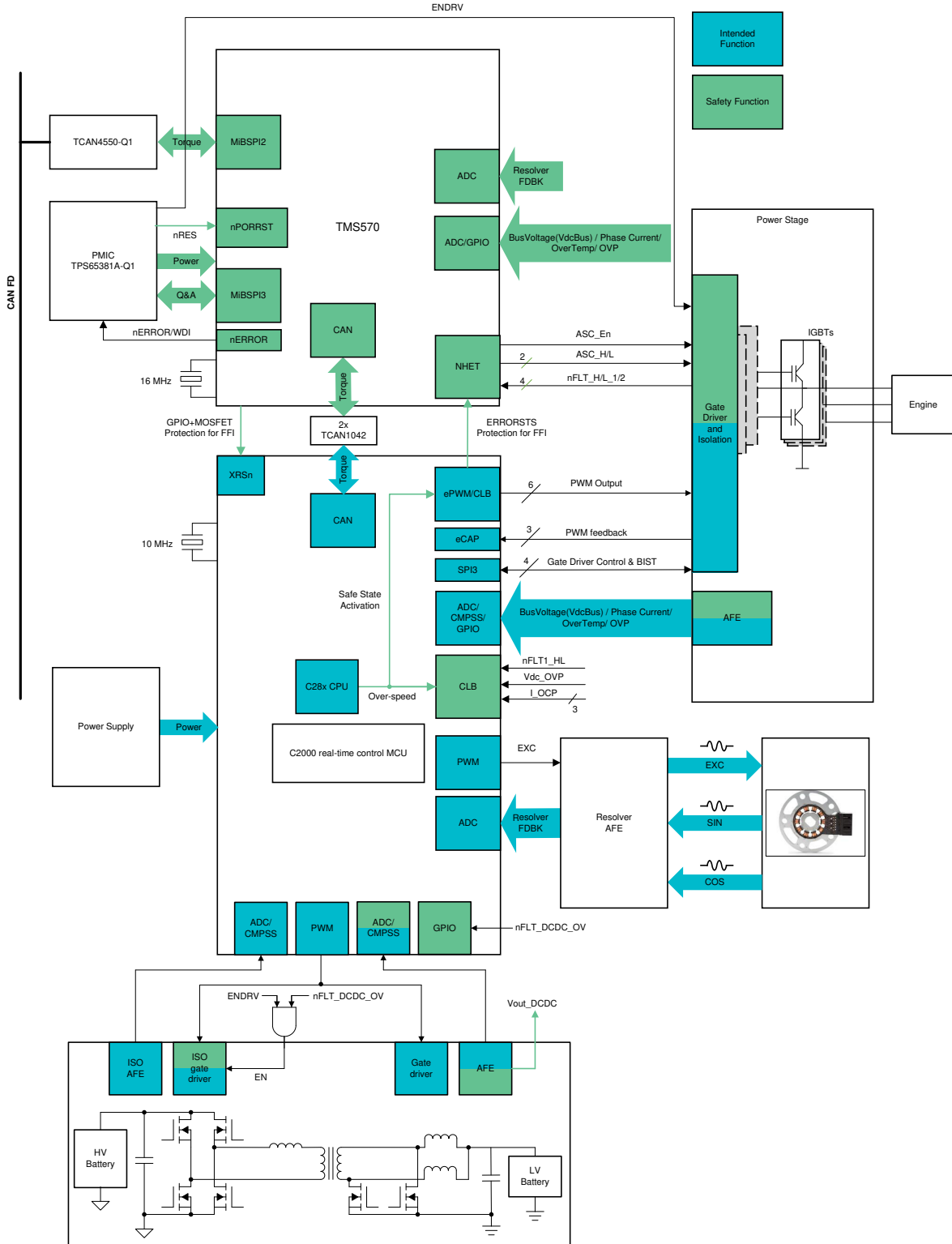


图 2-1. TIDM-02009 方框图

2.2 设计注意事项

牵引驱动子系统旨在驱动交流感应电机或者驱动内置永磁同步电机 (IPMSM) 与同步磁阻电机 (SynRM) 的某种组合。具有动态解耦功能的高带宽磁场定向控制 (FOC) 方案通过将 C2000 实时控制 MCU 与弱磁和过调制技术结合在一起来实现, 将电机驱动至高达 20,000RPM 的超高转速, 这可以降低牵引电机的成本和重量。

牵引驱动系统通常使用与电机极数匹配的可变磁阻 (VR) 旋转变压器来直接测量转子的电角。使用旋转变压器信号测量位置和速度时需要用到旋转变压器数字转换 (RDC)。传统的 RDC, 例如 PGA411-Q1, 采用单独的 IC 进行处理。有了 C2000 MCU, 高速牵引逆变器的 RDC 可以集成到主控 MCU 中, 在其中可以使用 DMA 来处理励磁的产生, 无需 CPU 参与, 而反馈通过 ADC 读取并使用 CPU 进行解码。

PSFB 拓扑允许开关器件以零电压开关 (ZVS) 进行开关, 从而降低开关损耗并提高效率。PCMC 是电源转换器非常需要的控制方案, 因为它具有固有的电压前馈、自动逐周期限流、磁通平衡和其他优点, 这需要生成复杂的 PWM 驱动波形以及快速高效的控制环路计算。借助于诸如 PWM 模块、带有 DAC 和斜率补偿硬件的模拟比较器以及与高效 32 位 CPU 耦合的 12 位高速 ADC 等先进片上控制外设, 可在 C2000 微控制器上实现这一目标。

2.3 主要产品

2.3.1 C2000™ MCU F2838x

C2000 MCU 属于经优化的 MCU 系列, 适用于实时控制应用。快速且高质量的模数控制器 (ADC) 可实现精确的电流和电压信号测量, 集成的比较器子系统 (CMPSS) 提供了过流和过压保护功能, 无需使用任何外部器件。经优化的 CPU 内核可快速执行控制环路。使用片上三角函数加速器 (TMU) 对三角函数运算进行了加速。该解决方案还提供了使用 F2838x 上的控制律加速器 (CLA) 的选项。CLA 是一款协处理器, 用于减轻 CPU 负载并支持在 C2000 MCU 上更快地运行循环或更多函数。

2.3.2 UCC5870-Q1 栅极驱动器

UCC5870-Q1 器件是一款符合功能安全标准且高度可配置的隔离式单通道栅极驱动器, 旨在驱动电动汽车/混合动力汽车牵引逆变器应用中的高功率 SiC MOSFET 和 IGBT。该器件提供功率晶体管保护功能, 例如基于分流电阻的过流保护、基于 NTC 的过热保护以及 DESAT 检测, 包括在这些故障期间可选择的软关断或两级关断。为了进一步缩小应用尺寸, UCC5870-Q1 集成了在开关期间可用的 4A 有源米勒钳位, 以及在驱动器未通电时可用的有源栅极下拉电阻。集成的 10 位 ADC 可用于监控多达 6 个模拟输入以及栅极驱动器温度, 从而增强系统管理。集成的诊断和检测功能可简化符合 ASIL-D 标准的系统的设计。这些功能的参数和阈值可使用 SPI 接口进行配置, 因此该器件几乎可与任何 SiC MOSFET 或 IGBT 一同使用。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

TIDM-02009 参考设计套件包含以下硬件模块

1. A F28388D controlCARD - [TMDSCNCD28388D F28388 controlCARD 评估模块](#)
2. TMS570 controlCARD
3. 电动汽车牵引和直流/直流转换器模块
 - a. 控制模块
 - i. 控制主板
 - ii. Vbat 至 5V/5A 电源模块
 - iii. Vbat 至 12V 电源模块
 - iv. 5V 至 15V 电源
 - v. 旋转变压器接口模块
 - vi. 模拟后端接口模块
 - vii. TCAN4550 模块
 - viii. TCAN1042 模块
 - b. 逆变器模块
 - i. 逆变器主板
 - ii. UCC5870 栅极驱动器模块
 - iii. 栅极驱动电源模块

- iv. 相电压感测模块
- v. 相电流感测模块
- c. 直流/直流模块
 - i. 直流/直流主板
 - ii. 栅极驱动器模块

3.1.1 硬件预览

如图 1-1 所示，该评估套件是一个开放式单元，没有外壳。该套件是通过组装前面几节中讨论的各种子模块构建而成的。该套件可以大致分为多个功能块，例如：

- 用于控制、实时连接和功能安全的控制模块
- 牵引逆变器模块
- 直流/直流转换器模块

本节提供了有关各模块的详细信息，还提供有关电源设计和各种电源模块注意事项的信息。

WARNING

对于采用高压的实验室评估，建议针对人员和设备（例如高压安全外壳、隔离式电源、仪器仪表和示波器）采取适当的安全预防措施。

3.1.1.1 控制模块

控制模块是为牵引电机和直流/直流转换器提供控制和功能安全特性的中央单元。该模块包含下列用于各种功能的各种子模块。

1. 控制处理器的控制卡 (TMDSCNCF28388D)
2. 安全处理器的控制卡 (TMS570LS1227)
3. 5V/5A 电源模块
4. 12V/1A 电源模块
5. 15V/0.5A 电源模块
6. 模拟后端模块
7. 旋转变压器模块
8. 基于 TCAN4550 和 TCAN1042 的 CAN 接口模块
9. 有助于监控各种电源的板载部分
10. 用于调节逆变器散热器风机速度的板载部分
11. 用于支持 JTAG 并提供 ETAS 链接的调试接头

一个完全组装好的控制模块如图 3-1 所示。

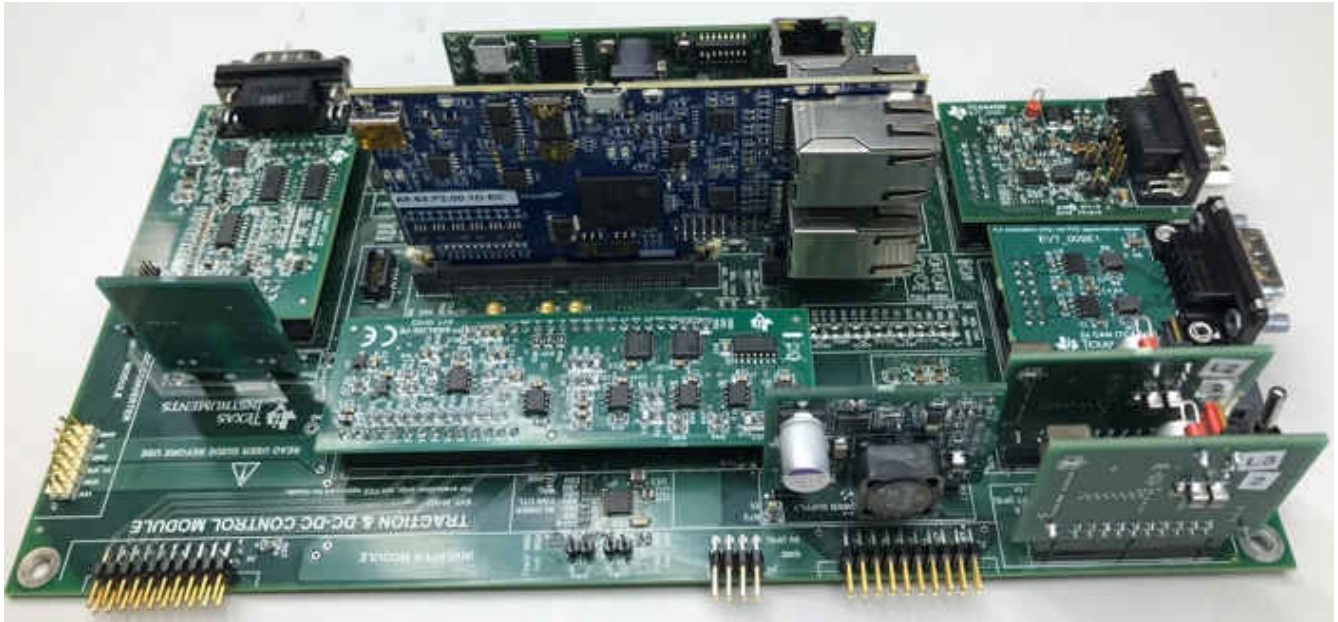


图 3-1. 控制模块

3.1.1.1.1 控制主板

控制主板是控制模块中的主机板。控制模块的大部分功能都是在插入到控制主板中的单独子卡上实现的。这种机制有助于在出现错误或需要改进时轻松进行调试并能为更换模块提供便利。该主板支持的模块如下：

1. 在 HSEC180 连接器插槽中装入控制处理器的控制卡 (TMDSCNCDF28388D)
2. 在 DIMM100 连接器插槽中装入安全处理器 (TMS570)
3. 通过连接器连接到牵引逆变器模块
4. 通过连接器连接到直流/直流转换器模块
5. 通过连接器装入控制单元的 5V/5A 电源以及逆变器栅极驱动器电源
6. 通过连接器装入直流/直流转换器栅极驱动器的 12V/1A 电源以及旋转变压器的 15V/0.5A 电源
7. 通过连接器装入模拟后端模块以处理来自逆变器的模拟信号反馈。该模块靠近处理器插槽是为了增加模拟信号链的完整性
8. 通过连接器装入旋转变压器模块以用作旋转变压器与 MCU 之间的模拟前端
9. 通过连接器装入基于 TCAN4550 和 TCAN1042 的 CAN 接口模块
10. 有助于监控各种电源的模块
11. 用于控制逆变器散热器散热风机风扇的模块
12. 用于支持 JTAG 并提供 ETAS 链接的调试接头

空的控制主板如图 3-2 所示。

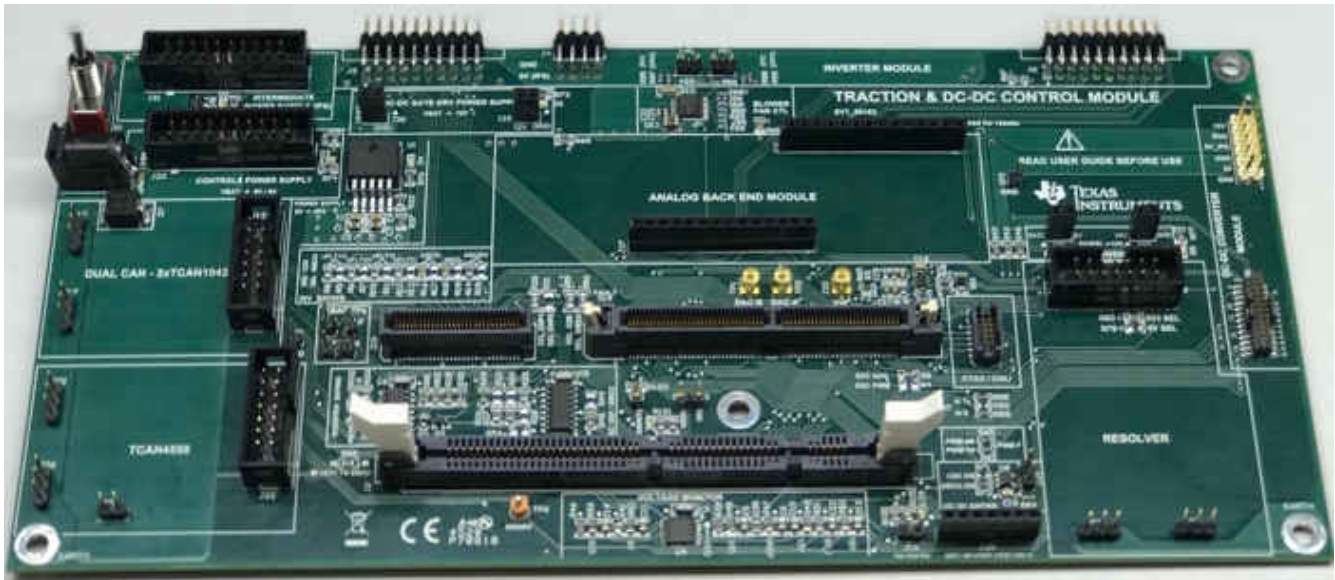


图 3-2. 控制主板

电池或电源提供的 12V 电力通过电源插孔 J14 馈送到主板。单刀双掷开关用于打开/关闭控制模块的电源。这个 12V 电源馈电给两个 5V/5A 电源：一个为整个控制模块供电（从中获得 3.3V 电压），另一个主要馈电给逆变器栅极驱动器电源。这个 12V 电源还馈电给 SEPIC 12 电源模块，进而馈电给直流/直流转换器栅极驱动器。为了实现测试过程中的灵活性，主板内置了一些选项，允许为某些控件选择 MCU 以及为旋转变压器接口选择电源。以下几节提供了这些方面的说明

3.1.1.1.1 逆变器安全 - UCC5870 ASC 和故障控制

为实现所期望的安全目标，牵引逆变器的安全运行对于系统级 ASIL-D 合规性至关重要。过流保护由 C2000 器件的 CMPSS 进行处理。这是一个可由软件编程的限值。对于逆变器特定的绝对最大限值，还有一个冗余硬件检测功能可检测过流。如果这些硬件无法及时检测到过流限值（例如短路），则需要快速响应以保护逆变器。UCC5870 是一款符合 ASIL-D 标准且具有许多功能的栅极驱动器。

为了实现主动短路 (ASC) 保护，用户可以选择在检测到此类事件时配置驱动器的逻辑状态。例如，用户可以关闭所有开关，或仅关闭底部开关或顶部开关。此参考设计有两个 MCU，每个 MCU 都有特定级别的功能安全要求。在开发和测试过程中，应该有一个选项可以通过安全 MCU 或控制 MCU 进行这方面的设置，或者可以采用默认设置。

第一阶段，通过多路复用器选择安全 MCU 设置与默认硬性设置之间的仲裁结果。默认设置是使用连接到 CD4053 多路复用器 XX_IN 引脚的电阻完成的，如图 3-3 所示。这些电阻可以连接到电源轨之一以设置所需的逻辑电平。这两个信号源（安全 MCU 设置与默认设置）之间的选择由 EN_DRV 信号完成，而该信号由安全 MCU 控制卡上的 PMIC 器件生成。如果激活 EN_DRV，则会为 ASC 选择默认电阻设置所确定的硬性设置，否则将选择安全 MCU 提供的设置。

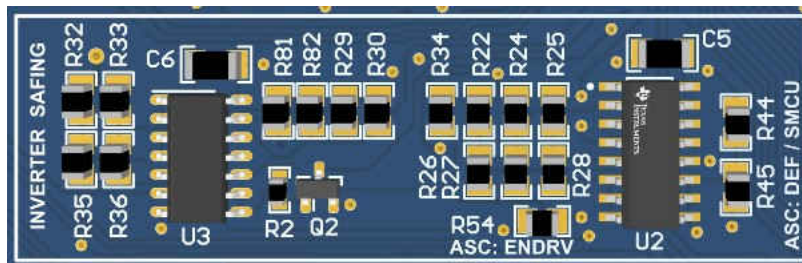


图 3-3. 安全 MCU 设置和默认设置之间的 ASC 逻辑选择

CAUTION

请勿将电阻 (R22 和 R26) 或 (R24 和 R27) 或 (R25 和 R28) 组装在一起, 因为这会导致控制电源轨 Vcc 与 GND 之间发生垂直短路。

在第二阶段, 在第一阶段的输出与 C2000MCU 的输出之间进行进一步的仲裁。这是使用将用作开关的 0E 电阻完成的。这些电阻将连接仲裁阶段输出和 UCC5870 栅极驱动器。除了 ASC 信号之外, 还有 nFLT_x_y 信号可表示低侧和高侧栅极驱动器的初级和次级侧故障。它们通过一组 0E 电阻连接到安全 MCU 或 C2000 MCU, 这些电阻与 ASC 第二阶段仲裁 0E 电阻并排存在, 如图 3-4 所示。装入左侧电阻将选择 C2000 MCU, 而装入右侧电阻将选择安全 MCU。

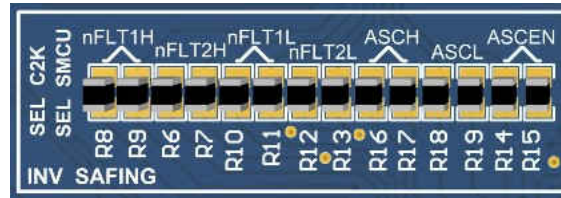


图 3-4. 在 C2000 MCU 和安全 MCU 之间进行选择以连接 ASC 和 nFLT

CAUTION

不要为了连接到这两个 MCU 来安装 ASC_x 选择的这两个电阻。ASC 信号连接到电源轨或由相应 MCU 驱动的数字输出, 因此将它们连接在一起可能会损坏处于不同逻辑电平的 GPIO。

nFLT_{xy} 信号是 MCU 的输入, 因此可以装入两个电阻以连接两个 MCU。

3.1.1.1.1.2 直流/直流安全

直流/直流转换器可以处理高电压和电流, 但转换器安全运行以达到期望的安全目标对于达到 ASIL D 标准至关重要。如果在转换器中检测到过压, 则根据设计会关断转换器。安全 MCU 将监控直流/直流转换器的安全运行, 并根据需要发送关断信号。如果安全 MCU 控制卡上的 PMIC 器件判定出不安全的功率级别, 它也可以关断转换器。但是, 在开发和测试过程中, 可能需要 C2000 MCU 来生成关断信号。可通过分别选择控制主板上的 0E 电阻 R71 和 R72 来选择 C2000 和安全 MCU。电路板的这个部分如图 3-5 所示。



图 3-5. 选择 MCU 以实现直流/直流安全

CAUTION

- 请勿同时装入电阻 R71 和 R72, 因为这会将两个 MCU 的输出连接在一起。如果已将它们配置为不同的极性, 则可能会损坏连接到这些电阻的 MCU 的输出引脚。
- 如果移除跳线 J34, 则将持续启用转换器。可在低电压调试期间使用该做法。当需要全功能运行时, 必须安装此跳线。

3.1.1.1.1.3 直流/直流转换器次级 PWM 选择

直流/直流转换器在初级侧需要 4 个 PWM, 在次级侧需要 2 个 PWM。次级侧的第一个 PWM 取自 EPWM6A。为灵活起见, 第二个 PWM 取自 EPWM6B 或 EPWM7A。其中之一将变为冗余项, 但它可以在实现过程中提供一些设计选项以便尝试不同方案。控制主板的相关部分如图 3-6 所示。



图 3-6. 次级 PWM 源选择

R65 上的 0E 电阻将选择 EPWM6B 作为第 6 个 PWM (PWM F) 的源，而 R63 上的 0E 电阻将选择 EPWM7A 作为源。

CAUTION

不建议将 R63 和 R65 安装在一起，最好保持互不干扰，以免在意外使用引脚时导致其他引脚发生故障或对引脚造成电气损坏。

如果需要，EPWM6B 和 EPWM7A 之间未使用的 GPIO 引脚可用作通用标志，并可在 R63 或 R65 的开放端子侧监控该引脚。

3.1.1.1.1.4 风机风扇控制

牵引逆变器能够应对相当高的功率水平（约 10KVA），并且在高开关频率（40KHz）下，开关损耗和传导损耗也相当高（>300W）。该 EVM 是实验室模型，不应改装到电动汽车/混合动力汽车中，因此使用了适合的风机冷却散热器来控制逆变器电源模块的温度。使用的风机采用 12V 工作电压（Dayton 2RTH4）且其转速可由 C2000 MCU 进行调节。C2000 MCU 的 PWM 脉冲由 TI 驱动器 DRV8876-Q1 进行驱动，从而能在应用于风扇电机之前提高功率水平。承载风机控制组件的控制主板部分如图 3-7 所示。



图 3-7. 风机风扇控制

电阻 R97 和 R99 应安装 0E 电阻以连接驱动器和风机风扇。接头 J11 和 J15 可用于连接两个风机电机。风机风扇在以 12V 电压高速运行时可能会产生噪音。如果在实验室评估中不需要如此高的转速（例如在较低的牵引功率水平下），则可以通过调整 C2000 的 PWM 脉冲来降低转速。

NOTE

当需要低速运行风机风扇时，它们可以在 5V（中间电源电压）下运行。风机仍然可以吹出足量的空气以将一些热量从散热器上带走。为此，可在 R95 和 R98 上安装 0E 电阻，同时移除电阻 R97 和 R99。用户需要监测和确定此类使用情况的热安全性。如果不能满足要求，则应放弃这种方法。

CAUTION

通过 PWM 控制，在较低的占空比下，DRV8876 中的片上续流二极管将具有较长的导通时间。二极管压降高于通道压降（在导通期间），因此在两个风扇一同使用的情况下会导致驱动器过热。为避免这一问题，可以参照上面给出的注释，或者可以使用高于 65% 的占空比，或者可以只使用一个风扇。在所有这些情况下，都要确保逆变器散热器通过风扇冷却到安全限制范围内。

3.1.1.1.1.5 电压监控器

安全 MCU 控制卡上的板载 PMIC 模块用于监控该控制卡上的电源。控制模块的其余部分不会使用相同的电源。为了让安全 MCU 监控该控制模块上的所有电源，这些外部电源通过模拟多路复用器引入到安全 MCU 的模拟通道中。这些电源包括 C2000 MCU 电源、旋转变压器电源和栅极驱动器输入电源。承载此监控电路的主板部分如图 3-8 所示。

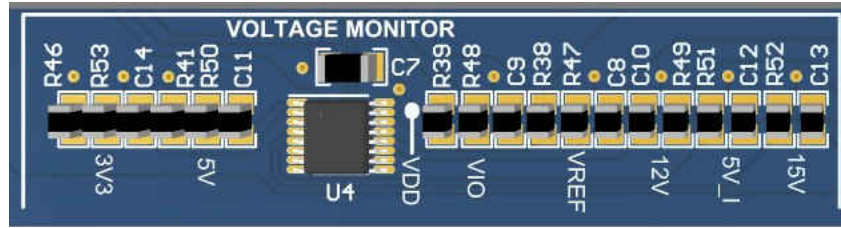


图 3-8. 通过安全 MCU 进行外部电源监控

NOTE

各种电源的电阻分压器按照设计可以确保它们的戴维南电压相差几百毫伏。即使在输入电压变化的最坏情况下，差异也应该足够大以避免发生任何重叠。

安全 MCU 会定期监控这些电压以确保它们处于正常范围。如果这些电压中的任何电压超出安全限值，安全 MCU 将关闭牵引逆变器和直流/直流转换器以确保进入安全状态。

3.1.1.1.1.6 旋转变压器接口控制

旋转变压器需要一个励磁信号，而这个信号由 C2000 MCU 提供。可选择使用 DAC 或 PWM 来提供此信号。EPWM8A 和 DAC-C 可以作为励磁源。R5 上的 0 欧姆电阻将选择 DAC 作为励磁源，而 R4 上的 0 欧姆电阻将选择 EPWM8A 作为励磁源。

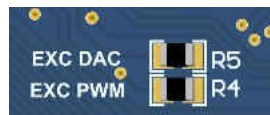


图 3-9. 旋转变压器载波励磁源选择

CAUTION

R4 和 R5 不应放在一起，它们是互斥的。否则，可能会损坏 C2000 MCU 中的相关 DAC 和 PWM 引脚。

3.1.1.1.1.7 控制模块上的测试点

控制主板上提供了通用模拟和数字测试点以用于调试。下面列出了这些测试点。

- **TP1 和 TP2** - 用于调试的 DAC 输出信号端口。根据设计，这两个测试点使用 MMCX 连接器和同轴电缆来获得更好的抗噪性能。这些测试点用于显示用户选择的任何 C2000 变量。这有助于跟踪控制环路中的中间变量。
- **TP3** - VDD。这是 C2000 MCU 内核的电源电压。
- **TP4** - VDDIO - 这是 C2000 MCU IO 的电源电压。
- **TP5** - ERRORSTS - 这是 C2000 MCU 报告的错误状态。
- **TP6** - EN_DRV - 这是用于了解安全 MCU 电源健康状况的电源监控 IC (PMIC) 输出。这用于启用驱动器。
- **TP7 至 TP10** - 连接到 CLB 输出 Xbar 的数字端口。除了用作数字端口，这还有助于显示任何可访问 CLB 输出 Xbar 的数字信号。

3.1.1.1.1.8 通用端口

该 EVM 专为自定义寻址核心功能而设计。为了给套件提供一定程度的灵活性以执行或简化某些功能，控制主板上提供了一些测试端口。如图 3-10 所示。



图 3-10. 通用端口

J18 和 J25 是测试端口。它们提供有限的灵活性，如下所述：

- J18 - 它可以连接到电位器，从而为 C2000 的 ADC 输入提供可变电压。这可用于控制如丝印上所示的风机风扇转速。此外，该模拟输入也可用于在开发过程中出于任何调节目的提供可变输入。
- J25 - 它可以提供两种不同的功能
 - QEP 端口 - 连接 QEP，用于使用不同电机进行基准测试以评估某些算法
 - SPI 端口 - 连接任何外部可通过 SPI 连接的器件

3.1.1.1.1.9 控制主板上的连接器和接头

表 3-1. 控制主板上的连接器和接头

连接器和接头	说明
J1、J19	180 引脚 HSEC 控制卡，用于承载 C2000 MCU 控制卡 (TMDSCNCF28388D)
J2	100 引脚 DIMM 连接器，用于承载安全 MCU 控制卡 (xxx----)
J3、J6	10x2 接头，用于与逆变器模块连接
J4	4x2 接头，用于与逆变器模块连接
J3、J6	10x2 接头，用于与逆变器模块连接
J5	Samtec 26 引脚 50 mil 接头，用于与直流/直流转换器连接
J7	6x2 接头，用于与直流/直流转换器连接
J8	3 引脚接头，用于为旋转变压器模块提供机械支持
J9	7x2 接头，用于与旋转变压器模块连接
J10	3 引脚接头，用于为旋转变压器模块提供机械支持，此外还通过散热器为旋转变压器电缆提供接地链接
J11、J15	2 引脚接头，用于与逆变器冷却风扇连接
J12、J17	3 引脚接头，用于为双 TCAN1042 模块提供机械支持，并通过散热器为 CAN 电缆提供接地链接
J13	7x2 接头，用于与双 TCAN1042 模块连接
J14	电源插孔，用于接收控制模块的电源输入
J16、J27	14 引脚单排接头，用于与模拟后端模块连接
J18	2 引脚接头，用于与电位器连接
J20、J21	10x2 接头，用于与 5V/5A 电源模块连接
J22	7x2 接头，用于与 TCAN4550 模块连接
J23、J26	3 引脚接头，用于为 TCAN4550 模块提供机械支持，并通过散热器为 CAN 电缆提供接地链接
J24	2 引脚接头，用于为 TCAN4550 模块提供 Vbat 电源
J25	7 引脚条形连接器，用于传输开放式外部接口的 QEP/SPI 信号
J28	14 引脚 50 mil Samtec Tiger Eye 端子板，用于连接 ETAS/JTAG 接口
J29、J30	2 引脚接头，用于与 12V/1A 电源连接
J31、J32	2 引脚接头，用于与 15V/0.5A 电源连接
J33	MMCX-TH 插孔连接器，用于连接来自直流/直流转换器的直流/直流初级电流信号
J34	2 引脚跳线接头，用于中断直流/直流安全控制

3.1.1.1.2 电源

电源是控制电子设备所需的重要部件，并基于隔离、噪声和安全等因素分为多个单元。电源分配图的简要概况如图 3-11 所示。控制电子设备的电源输入应该来自车辆电池。对于实验室用途，额定值为 12V/5A 的电源足以为控制器供电。

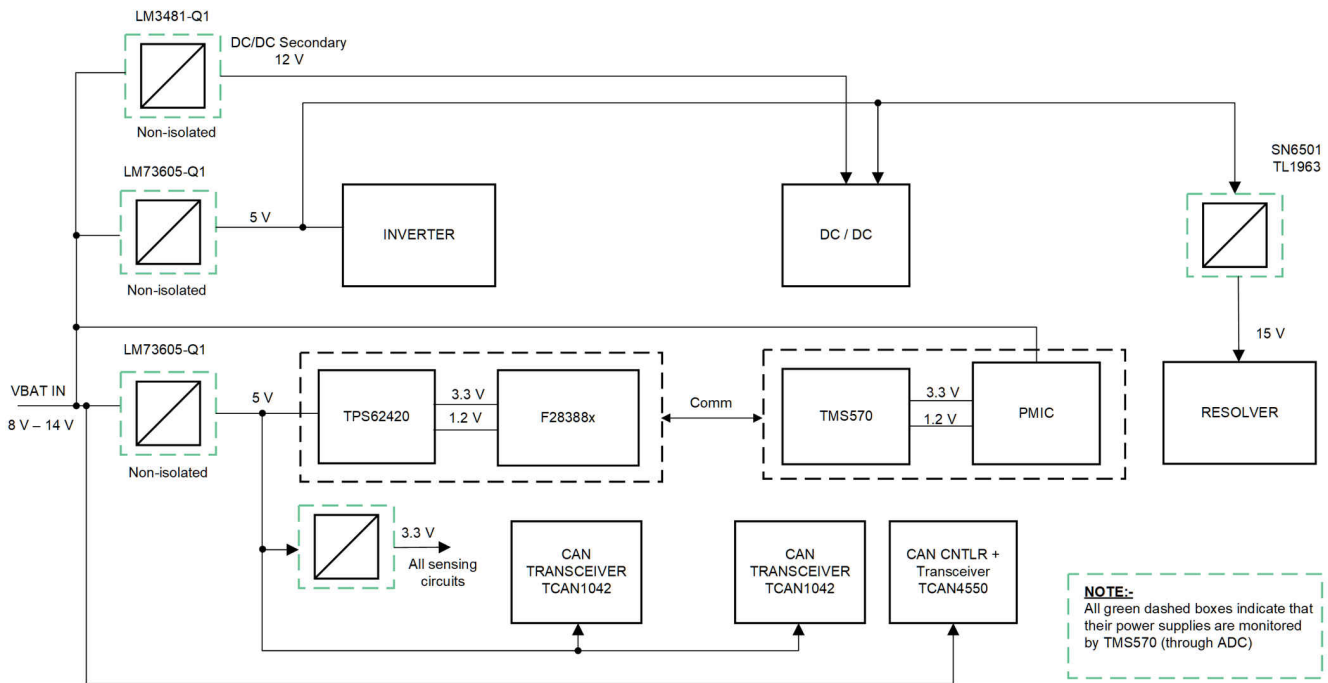


图 3-11. 电源分配

C2000 MCU 控制卡及其相关电路采用了专门设计的 5V/5A 电源。一个线性稳压器用于为主板上与 C2000 MCU 交互的外设模块提供 3.3V 电压。

安全 MCU 控制卡接受 12V 的电池电压。该控制卡具有 PMIC (TPS65381A-Q1)，可提供安全 MCU 及其相关卡上电路所需的工作电压。

另一个 5V/5A 专用电源主要设计用于为牵引逆变器栅极驱动器生成隔离式电源。这个 5V 电源本质上是一个中间级，有助于简化后续栅极驱动器电源的设计。该电源还用于为旋转变压器前端提供 15V 电源，并在需要时运行用于冷却逆变器散热器的风机。该电源可由控制和安全 MCU 开启/关闭。

一个 12V/1A 电源设计用于为直流/直流转换器的次级栅极驱动器供电。

即使这些电源共享同一个 GND，也要注意在需要的地方分离 GND 平面，并将它们连接在一起以靠近电路板的电源入口。以下几节介绍了每个电源模块。

3.1.1.1.2.1 电源 5V/5A

这是一个基于 LM73605-Q1 的紧凑型电源模块。该设计参考了 LM73605/LM73606 EVM 用户指南。此用户指南中提供了详细的设计信息。该模块的布局经过自定义，旨在满足此电动汽车牵引参考设计的要求，如图 3-12 所示。



图 3-12. Vbat 至 5V/5A 电源模块

该模块有一个 3 引脚跳线 J1。如果连接引脚 1 和 2，则该模块会在获得输入电源后立即自动提供 5V 电压。或者，如果连接引脚 2 和 3，则连接器 J3 引脚 6 上的信号逻辑电平将启用该模块。此参考设计中使用了该模块的两个实例，它们安装在控制主板的 20 引脚连接器 J20 和 J21 上。安装在 J20 上的电源模块将为主板中的控制 MCU 电路供电，因此只要为该单元提供电源，电源模块就应处于开启状态。因此，它在 J1 上的跳线应连接引脚 2 和 3。安装时，该电源模块的组件侧应面向主板上的二极管 D7。

NOTE

J1 的引脚 1 面向板边缘

安装在 J21 上的电源模块将用作中间功率级，有助于为栅极驱动器的隔离式电源和旋转变压器的 15V 电源供电。该电源设计为由控制和安全 MCU 开启/关闭，因此该电源模块的 J1 上的跳线应连接引脚 1 和 2。安装时，该电源模块的组件侧应面向主板上的二极管 D7。它分别通过主板上的连接器 J4 和 J31 提供给逆变器和旋转变压器模块使用。

3.1.1.1.2.2 电源 12V/1A

这是一个基于 LM3481-Q1 的紧凑型 SEPIC 电源模块。该设计参考了 TI 的 LM3481 SEPIC 评估板用户指南。此用户指南中提供了详细的设计信息。该模块的布局经过自定义，旨在满足电动汽车牵引参考设计的要求，如图 3-13 所示。

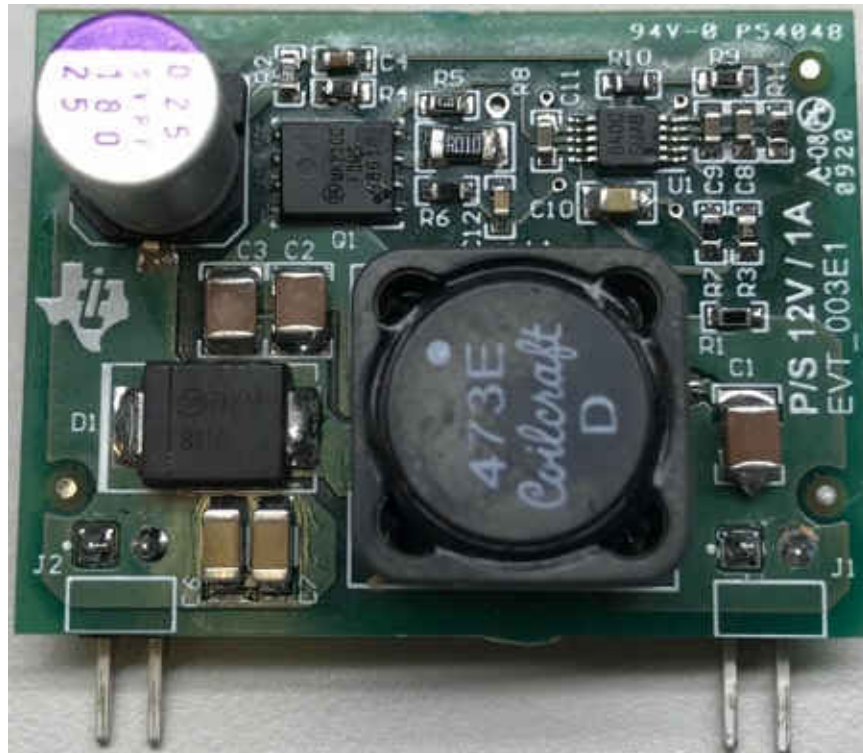


图 3-13. Vbat 至 12V/1A 电源模块

该模块安装在主板连接器 J29 和 J30 上，其组件侧将面向逆变器连接器。该模块将向直流/直流转换器的栅极驱动器电路馈电，并通过主板的连接器 J7 来提供。

3.1.1.1.2.3 电源 15V/0.5A

这是另一个基于 [SN6501-Q1](#) 和 [TL1963A-Q1](#) 的紧凑型电源模块。该设计参考了具有 [3.3V/5V 输入和 12V/15V 输出的信号和电源隔离设计](#)。此用户指南中提供了设计信息。该模块的布局经过自定义，旨在满足此电动汽车牵引参考设计的要求，如 [图 3-14](#) 所示。

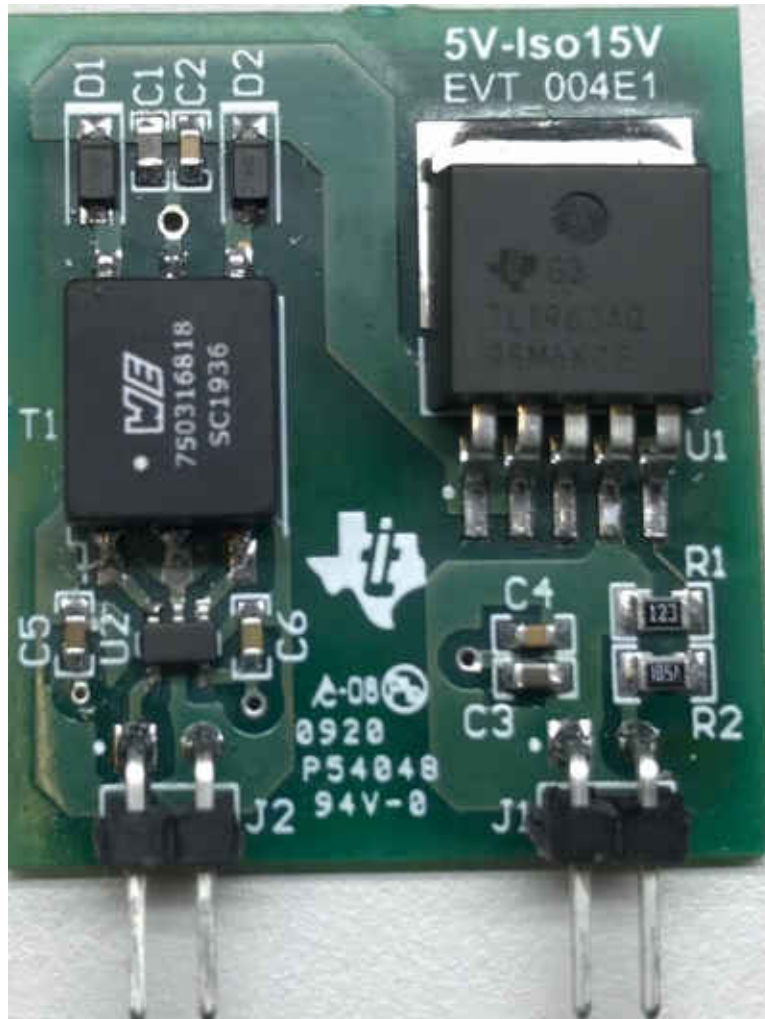


图 3-14. 5V 至 15V/0.5A 电源模块

该模块由中间 5V 电源供电，其输出将为旋转变压器模块供电。该模块将安装在控制主板连接器 J31 和 J32 上，其组件侧将面向主板上的旋转变压器模块连接器 J9。

3.1.1.1.3 TCAN4550 模块

除了帮助满足信号接口要求外，该模块还为安全 MCU 提供 CAN-FD 功能。该模块的设计采用了 [TCAN4550-Q1](#) 并基于 [TCAN4550EVM](#)。该模块的布局经过自定义，旨在满足此电动汽车牵引参考设计的要求，如 [图 3-15](#) 所示。



图 3-15. TCAN4550 模块

该模块安装在连接器接头 J22、J23、J24 和 J26 上。接头 J24 将电路板输入电源连接到该模块，而信号由 J22 处理。接头 J23 和 J26 为 TCAN 电缆上拾取的噪声提供接地路径。

3.1.1.1.4 双 TCAN 模块

该模块为 C2000 和安全 MCU 提供基本的 CAN 通信接口。该模块的设计采用了 [TCAN1042-Q1](#) 并基于 [TCAN 评估模块](#)。该模块的原理图和布局非常简化，旨在满足电动汽车牵引参考设计的要求，如 [图 3-16](#) 所示。



图 3-16. 双 TCAN 模块

该模块安装在连接器接头 J12、J13 和 J17 上。接头 J13 将 5V 电源和信号连接到该模块。接头 J12 和 J17 为 TCAN 电缆上拾取的噪声提供接地路径。

3.1.1.1.5 模拟后端模块

模拟后端模块作为后端模拟重构模块，用于处理从牵引逆变器模块和直流/直流转换器模块接收的差分反馈信号。该模块的设计采用了 [TLV6001](#) 和 [OPA2350](#) 以及其他标准线性器件。该模块如图 3-17 所示。

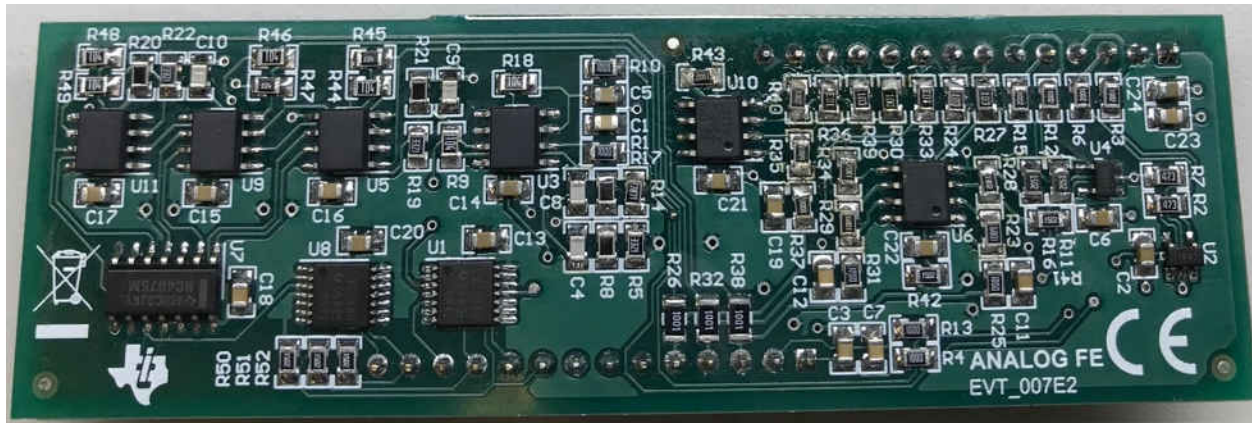


图 3-17. 模拟后端模块

该模块安装在控制主板接头 J16 和 J27 上。该模块的基本作用是将牵引逆变器和直流/直流转换器的相电流和直流总线电压信号重构为低压模拟信号。这些信号再作为 ADC 输入提供给主板中的控制和安全 MCU。此外，该模块还提供绝对过流的数字状态反馈，在这种情况下可以通过该模块中的电阻 R19、R20、R21 和 R22 来设置限制。另外，也提供过压的数字状态反馈，在这种情况下会通过电阻 R14 和 R17 来设置限制。还有过热检测电路，但该电路的用途改为测量直流/直流转换器电压，并会忽略其限制保护。越界状态将锁存起来，并由 MCU 根据用户的选择进行清除。

3.1.1.1.6 旋转变压器模拟前端模块

旋转变压器模拟前端模块可满足旋转变压器与 MCU 协同工作的所有模拟接口要求。它有两个主要功能：

- 励磁信号放大：该模块将 MCU 产生的正弦信号通过 DAC 或 PWM 接口滤波成平滑的正弦励磁载波信号，并放大成合适的电压和功率电平，然后馈入旋转变压器的励磁绕组。
- 反馈信号调节：旋转变压器的双极性正弦和余弦输出调节为单极性信号，以适应 MCU 的 ADC 测量范围。

该模块的设计采用了 [ALM2402F-Q1](#) 以及标准线性器件。ALM2402F-Q1 是一款双通道高功率运算放大器，具有集成的旋转变压器电流限制和过热保护功能。该模块如图 3-18 所示。

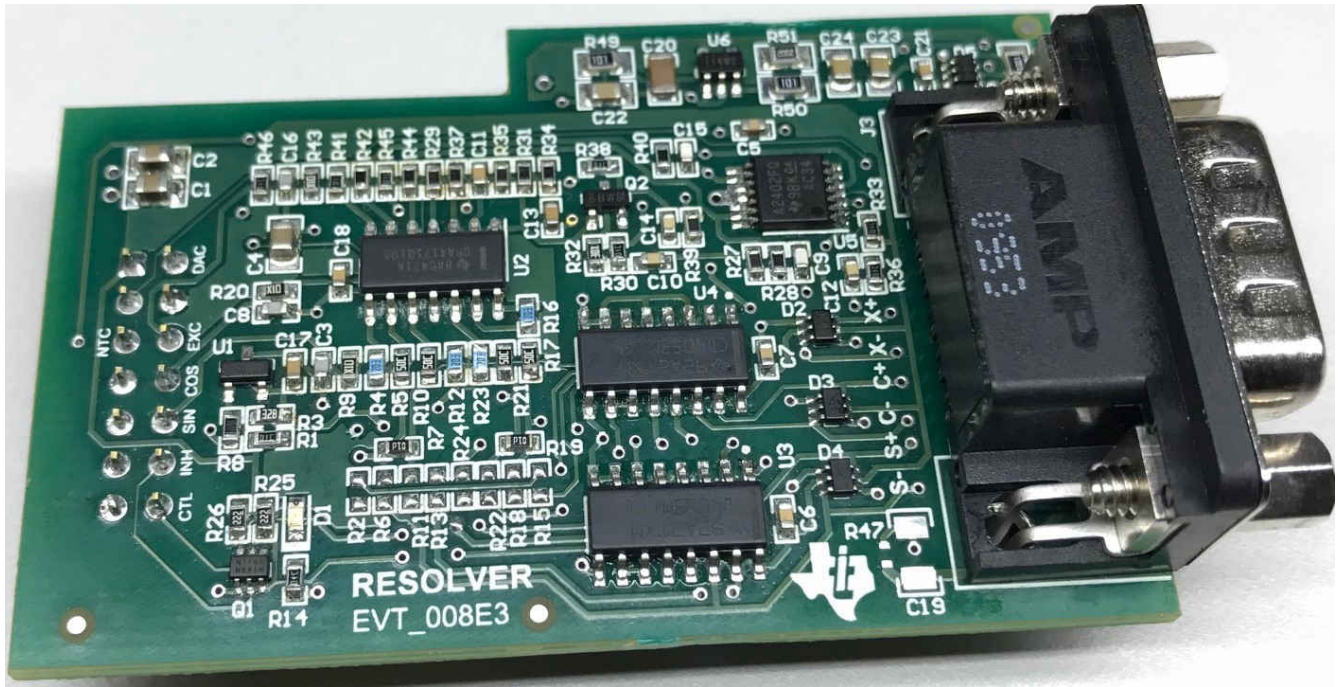


图 3-18. 旋转变压器模拟前端模块

该模块安装在控制主板接头 J8、J9 和 J10 上。所有电源和信号都流经 J9，而通过 J10 可以访问旋转变压器电缆拾取的噪声信号的接地端。J8 为模块提供机械支持。该模块有一个多路复用器 **CD4053B-Q1**，这个器件有助于将正弦和余弦信号交叉馈入 ADC 以验证信号和通道的完整性，从而确保安全估算转子位置。该模块还与旋转变压器热敏电阻连接，并提供代表旋转变压器温度的模拟信号以供 MCU 进行跟踪。

3.1.1.2 逆变器模块

逆变器模块用于为牵引电机供电，使电机以一定的扭矩运行。这是一个插入控制主板的独立模块，用于接收控制电源和信号，并发送回逆变器电压和电流感测信号作为反馈。该模块包含下列用于各种功能的各种子模块：

1. 逆变器主板
2. UCC5870 ASIL-D 栅极驱动器模块
3. 栅极驱动电源模块
4. 电压感测模块
5. 电流感测模块

牵引逆变器子系统的方框图如图 3-19 所示。

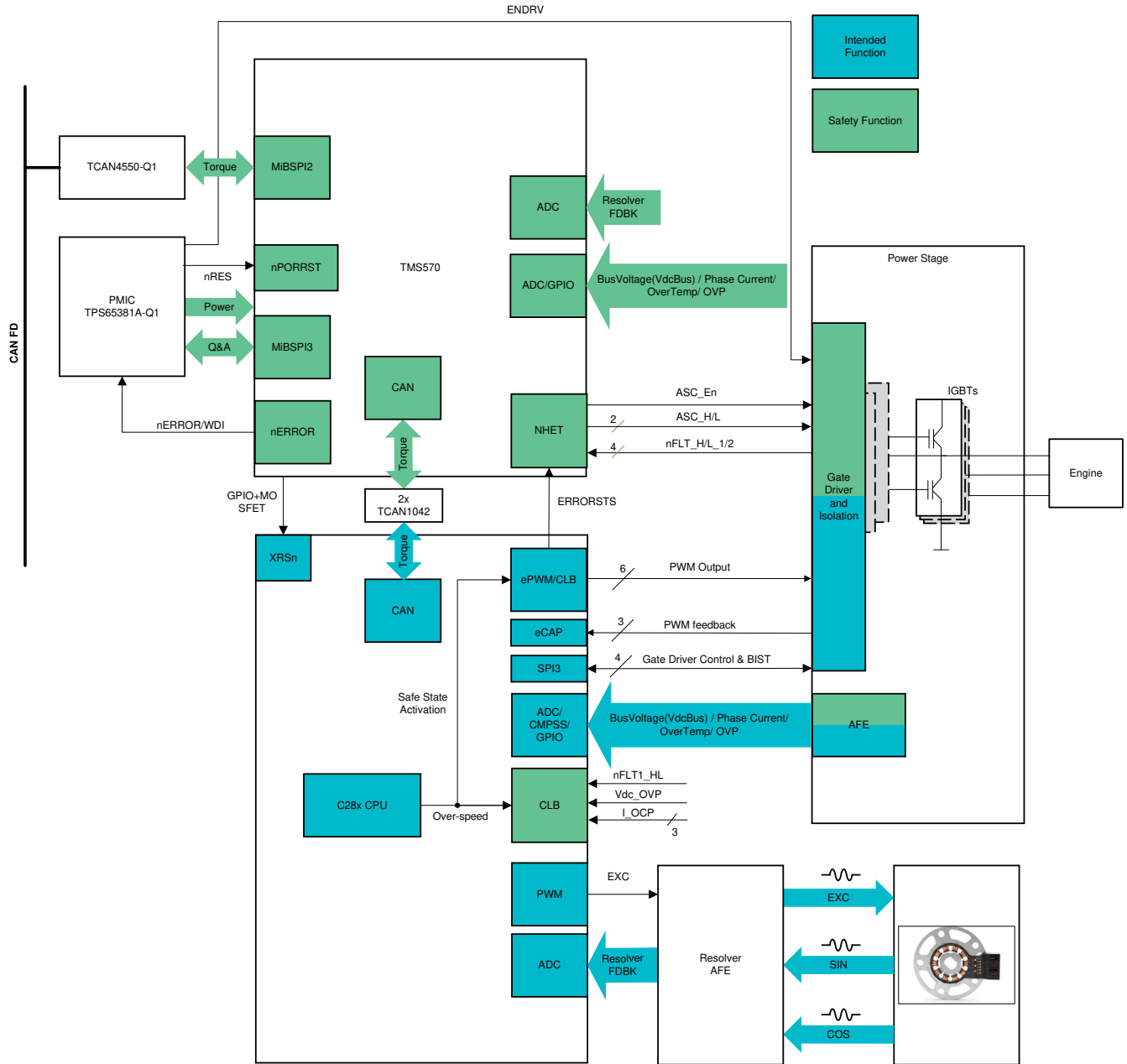


图 3-19. 电动汽车牵引逆变器系统方框图

一个完全组装好的逆变器模块如图 3-20 所示。各个子模块的详细信息将在后续几节中讨论。

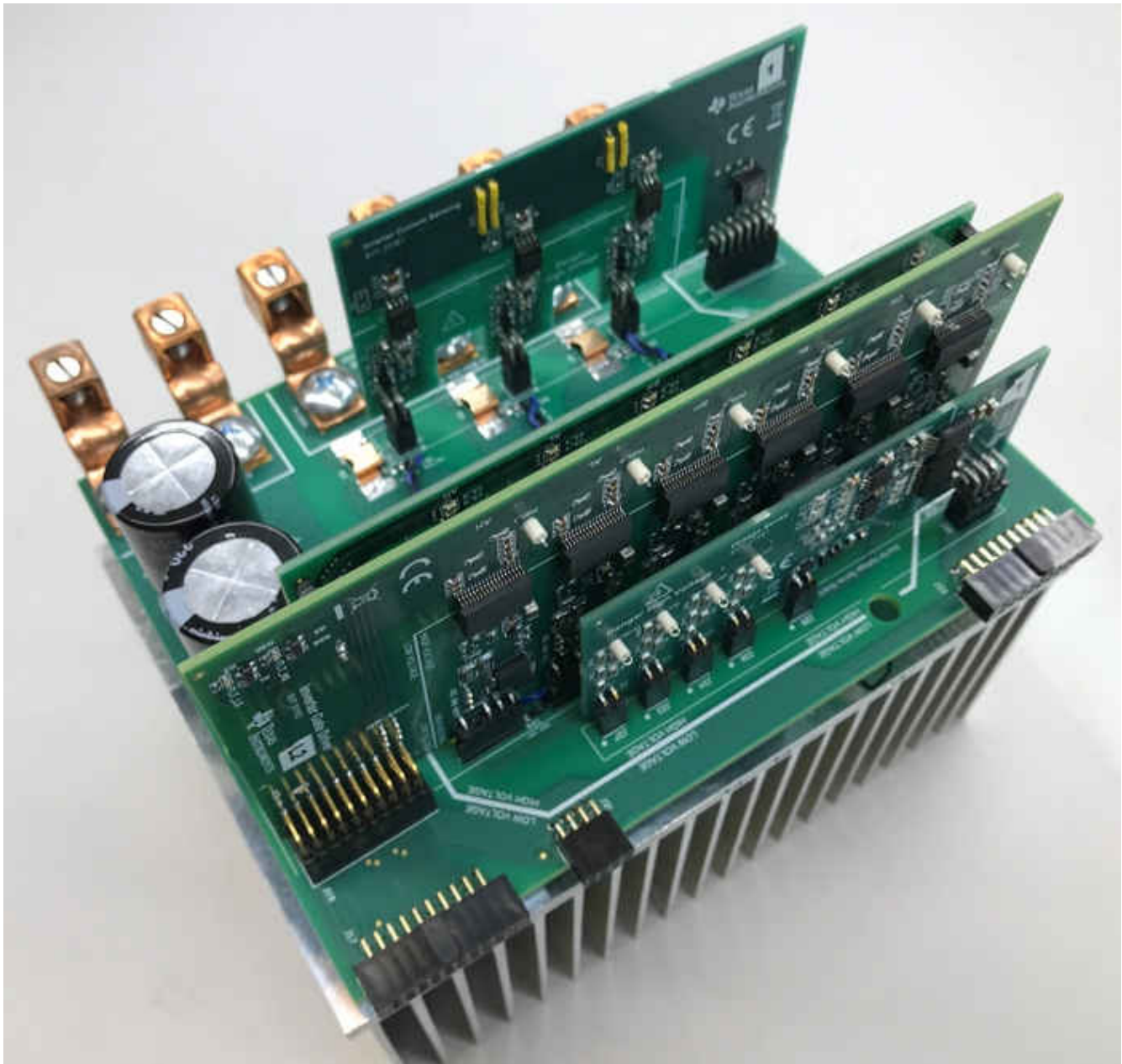


图 3-20. 逆变器模块

逆变器模块平装在控制主板的 J3、J4 和 J6 接头上。

3.1.1.2.1 逆变器主板

逆变器主板是逆变器模块中的主机板。它包含一个额定值为 1200V/50A 的三相 SiC 逆变器模块、一个散热器和一个用于散热的风机风扇。逆变器模块的某些功能是在插入到逆变器主板中的单独子卡或子模块上实现的。这种机制有助于在出现错误或需要改进时轻松进行调试并能为更换模块提供便利。逆变器主板具有各种连接器来连接控制模块和各种子模块。此外，它还具有相应的 PCB 终端，用于安装高功率接线片，从而馈入高功率直流电以及将高功率逆变器输出拉至电机。该主板支持的模块如下：

1. UCC5870 ASIL-D 栅极驱动器模块
2. 电压感测模块
3. 电流感测模块

逆变器主板如图 3-21 所示。

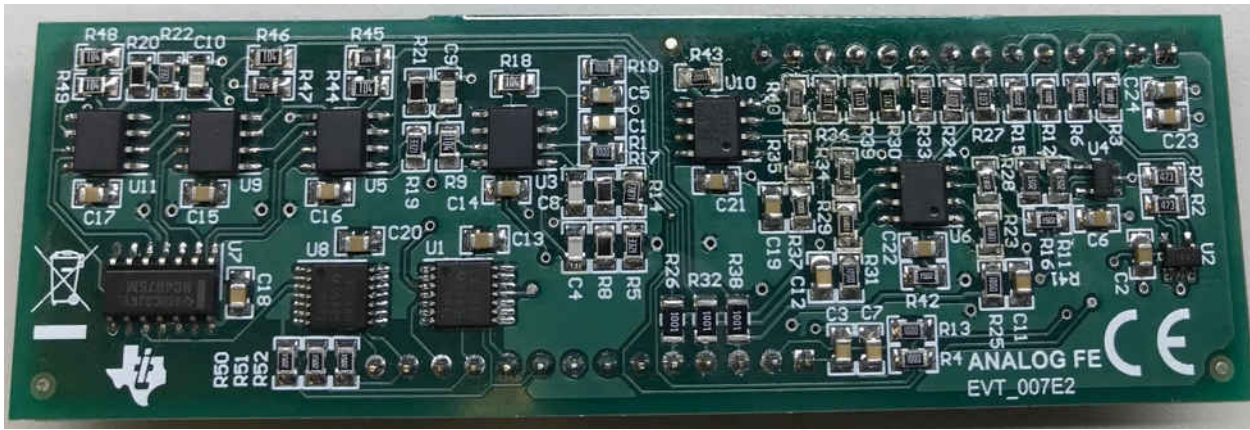


图 3-21. 逆变器主板

逆变器主板的两侧均采用 2 盎司铜制造，大电流布线/平面在两侧平行布置，可提供 4 盎司的有效厚度。该主板的连接器 J17、J21 和 J22 将与控制主板接头 J3、J4 和 J6 配接，从而接收控制信号以及发送反馈信号。

3.1.1.2.1 逆变器主板上的连接器和接头

表 3-2. 逆变器主板上的连接器和接头

连接器和接头	说明
J1、J3、J6、J18	5 引脚 100mil 插座接头（在第二个位置极化断开），用于连接到栅极驱动器模块
J5、J8、J11	2x2 100mil 插座接头，用于连接到电流感测模块
J10、J13	4 引脚 100mil 插座接头（在第二个位置极化断开），用于连接到栅极驱动器模块
J15	2 引脚插座接头，用于连接到栅极驱动器模块
J16	4x2 插座接头，用于连接到电流感测模块
J17、J22	10x2 直角插座接头，用于连接到控制主板
J19	10x3 插座接头，用于连接到栅极驱动器模块
J20	4x2 插座接头，用于连接到电压感测模块
J21	4x2 直角插座接头，用于连接到控制主板
J23、J24、J25、J26、J27	2 引脚条形插座接头，用于连接到电压感测模块
T1、T2、T3、T4、T5、T6	PCB 上的接线片端子焊盘，用于连接到高压电源、牵引电机和接地端

3.1.1.2.1.2 逆变器模块上的跳线和测试点

逆变器模块上提供了一些用于调试的测试点，尤其是在 SiC 逆变器电源模块的所有栅极驱动引脚上，而其他一些测试点用于在它们之间建立连接，本质上用作跳线点。

表 3-3. 跳线点表

跳线点	用途
TP1 和 TP2	将直流总线电压 V_{dc} 连接到栅极驱动器模块，以使栅极驱动器 UCC5870 对高侧开关进行保护
TP3 和 TP7	为 A 相连接隔离式 15V+。需要使用这些测试点为热侧电源馈电，以实现 A 相的隔离式电流感测
TP4 和 TP8	为 A 相连接隔离式 15V- *
TP5 和 TP6	为 B 相连接隔离式 15V+。需要使用这些测试点为热侧电源馈电，以实现 B 相的隔离式电流感测
TP11 和 TP12	为 B 相连接隔离式 15V- *
TP9 和 TP10	为 C 相连接隔离式 15V+。需要使用这些测试点为热侧电源馈电，以实现 C 相的隔离式电流感测
TP13 和 TP14	为 C 相连接隔离式 15V- *

表 3-4. 测试点表

测试点	信号名称
TP15 和 TP16	分别是开关 AH 的栅极和源极

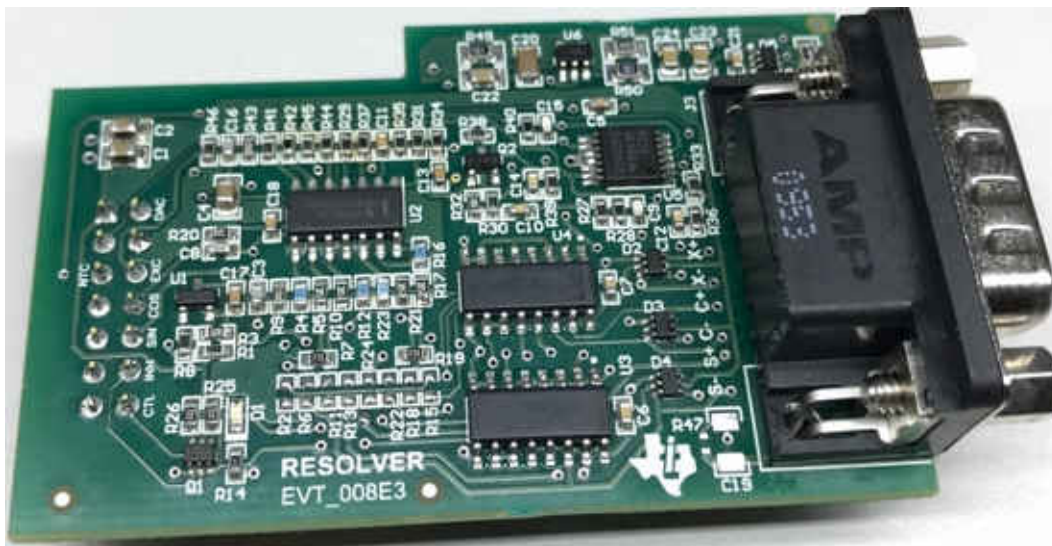
表 3-4. 测试点表 (continued)

测试点	信号名称
TP17 和 TP18	分别是开关 BH 的栅极和源极
TP19 和 TP20	分别是开关 CH 的栅极和源极
TP21 和 TP22	分别是开关 AL 的栅极和源极
TP23 和 TP24	分别是开关 BL 的栅极和源极
TP25 和 TP26	分别是开关 CL 的栅极和源极

3.1.1.2.2 逆变器栅极驱动器模块

栅极驱动器模块是用 **UCC5870-Q1** 隔离式栅极驱动器构建而成的。UCC5870-Q1 器件是一款符合功能安全标准且高度可配置的隔离式单通道栅极驱动器，旨在驱动电动汽车/混合动力汽车应用中的高功率 SiC MOSFET 和 IGBT。该器件提供功率晶体管保护功能，例如基于分流电阻的过流保护、基于 NTC 的过热保护以及 DESAT 检测，包括在这些故障期间可选择的软关断或两级关断。该器件能够提供和汲取 15A 的栅极驱动电流，支持高电容大电流、高电压电源开关，还集成了在开关期间可用的 4A 有源米勒钳位，以及在驱动器断电时可用的有源栅极下拉电阻。栅极驱动器运行模式和保护功能在上电时由 C2000 MCU 通过 SPI 进行编程。此外还使用 SPI 进行验证、监控和诊断。诊断和检测功能的集成度更高，因此可以简化符合 ISO 26262 ASIL D 标准的系统的设计。

栅极驱动器板的设计参考了 **UCC5870QDWJEVM-026 评估模块用户指南**。此用户指南中提供了详细的设计信息。由于电源模块的紧凑外形，所有栅极驱动器都设计在一块板上以便优化布线长度，同时确保每个驱动器级之间的空间距离合适且安全，如图 3-22 所示。


图 3-22. UCC5870 栅极驱动器模块

与 MCU 的连接是通过 3x10 接头完成的，该接头可将 PWM、SPI 信号从 MCU 链接到 UCC5870，并将 nFLT 信号从 UCC5870 链接到 MCU。栅极驱动器板的尺寸受到限制，因此设计了单独的电源模块来满足栅极驱动器次级侧的隔离式电源要求。该电源模块安装在栅极驱动器板背面的接头 J2、J4、J4_x 以及两个用于为栅极驱动器模块提供机械支持的额外接头 (J3、J6) 上。

栅极驱动器模块安装在逆变器主板插座接头 J1、J3、J6、J10、J13、J15、J18 和 J19 上。

3.1.1.2.2.1 逆变器栅极驱动电源模块

所有 UCC5870 次级的隔离式栅极驱动电源均设计在单独的板上，并安装在栅极驱动器卡的背面。这是为了缩短电源与栅极驱动器次级电路之间的接触长度。该模块的设计采用了 **SN6501-Q1** 并基于 **具有 3 种 IGBT/SiC 偏置电源解决方案的混合动力汽车/电动汽车牵引逆变器功率级参考设计**。所选次级电压为 +18V 和 -4V，额定电流约为 180mA。该电源可以使用其输出电容器中存储的能量来满足瞬时电流尖峰需求。

电源的设计基于稳定的 5V 输入，无次级调节。它可以产生固定的升压次级电压。对于给定的电源负载水平，次级调节并不认为是必需的。六个电源设计在一块板上，为确保安全的电压合规性，它们之间有足够的间距。电路板如图 3-23 所示。



图 3-23. 栅极驱动器电源模块

栅极驱动电源模块安装在栅极驱动板背面的接头 J2、J4_x、J3 和 J6 上。J4_x 是一个 3 引脚连接器，用于为每个驱动器提供电源。J3 和 J6 是非电气连接器，其唯一作用是在栅极驱动器和栅极驱动电源板之间的配接位置提供机械稳定性和间距。

3.1.1.2.3 逆变器电流感测模块

电流感测模块旨在提供逆变器相电流的隔离式差分模拟反馈。该模块的设计采用了隔离放大器 AMC1302-Q1 并基于 AMC130x 评估模块。此电路板如图 3-24 所示。

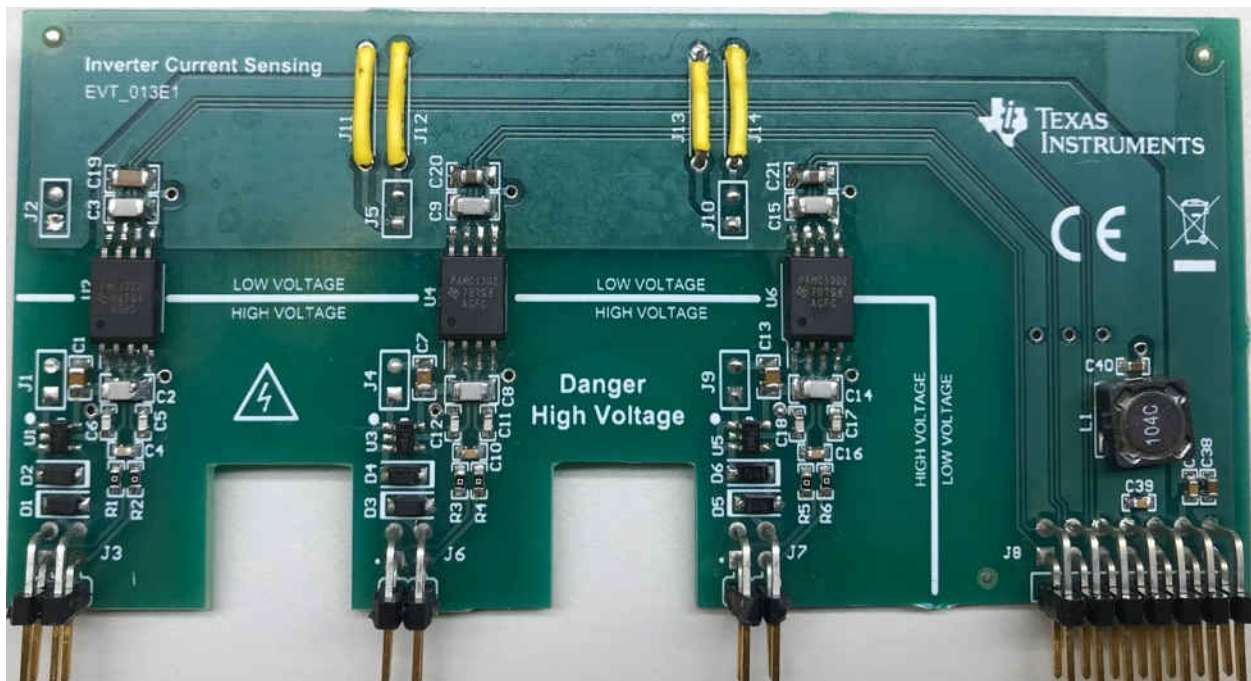


图 3-24. 逆变器电流感测板

AMC1302 通过测量分流电阻上的压降来测量相电流。其设计的输入电压范围为 $\pm 50\text{mV}$ ，因此只需要一个低阻值的分流电阻，用以降低功耗。该器件具有低漂移的固定增益 ($41 \pm 0.3\%$, $\pm 50\text{ppm}/^\circ\text{C}$)、低输入失调电压和漂移、低非线性和漂移、高于 200KHz 的输出带宽以及低于 $2\mu\text{s}$ 的上升时间/下降时间。所有这些特性使得这款器件很适合此应用。

AMC1302 需要为高压 (热) 侧和低压 (冷) 侧分别提供单独的电源。对于每个相位, AMC1302 热侧的隔离式电源来自该相位的高侧栅极驱动器的次级电源 (AH、BH、CH) 并降压至 3.3V。或者, 使用通过 J8 连接到该板的中间 5V 电源, 可将辅助性的 5V 至 5V 隔离式模块安装在其接头 J1 和 J2、J4 和 J5 以及 J9 和 J10 上, 分别用于 A、B 和 C 相。冷侧电源由 8x2 接头上的控制主板提供。该模块安装在逆变器主板的接头 J5、J8、J11 和 J16 上。反馈信号输出到逆变器主板的 8x2 连接器 J16。

表 3-5. 辅助性接头

接头	说明
J1、J2	用于 A 相热电流感测侧的备用 5V 至 Iso 5V 模块
J4, J5	用于 B 相热电流感测侧的备用 5V 至 Iso 5V 模块
J9、J10	用于 C 相热电流感测侧的备用 5V 至 Iso 5V 模块

3.1.1.2.4 逆变器电压感测模块

电压感测模块旨在提供逆变器相位输出电压的数字反馈以及直流总线电压的模拟反馈。所有反馈信号均被隔离。数字反馈由 ISO7240CF-Q1 和一些标准线性器件提供。模拟差分反馈由 TI 的隔离放大器 AMC1311-Q1 提供并基于具有差分输出的 $\pm 480\text{V}$ 隔离式电压感测电路。此电路板如图 3-25 所示。

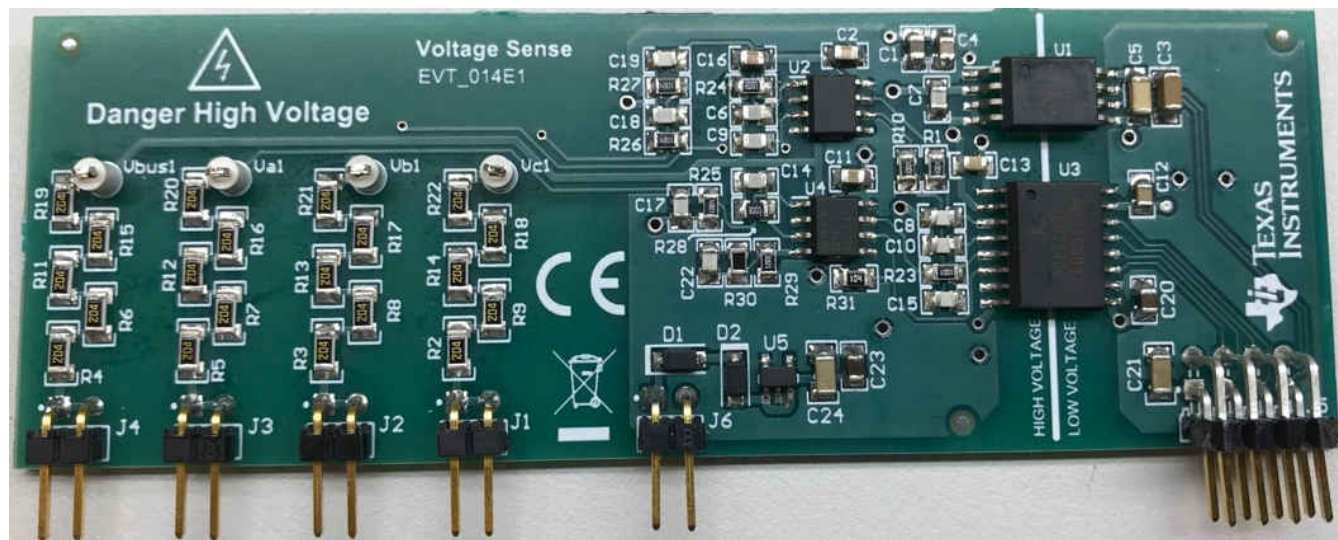


图 3-25. 逆变器电压感测板

AMC1311 在 2V 输入电压范围内提供良好的线性性能, 并具有较高的源阻抗。该器件具有低偏移量误差和漂移, 固定增益为 1, 增益误差和漂移极低, 非线性和漂移较低, 且输出带宽超过 200KHz, 因此, 非常适用于直流测量。

AMC1311 需要为高压 (热) 侧和低压 (冷) 侧分别提供单独的电源。AMC1311 热侧的隔离式电源来自低侧栅极驱动器的次级电源 (CL) 之一, 并且降压至 3.3V。冷侧电源由 4x2 连接器供电。该模块安装在逆变器主板的接头 J20、J23、J24、J25、J26 和 J27 上。反馈信号输出到逆变器主板的 4x2 连接器 J20。

3.1.1.3 直流/直流双向转换器模块

双向直流/直流转换器模块按照设计可在正向运行时从高压电池总线为低压电池充电, 并在反向运行时为直流总线电容器预充电。这是一个插入控制主板的独立模块, 用于接收控制电源和信号, 并发回逆变器电压和电流检测信号作为反馈。该模块包含一个主板以及两个用于隔离式初级栅极驱动器和电源的栅极驱动器子板。

牵引逆变器子系统的方框图如图 3-26 所示。

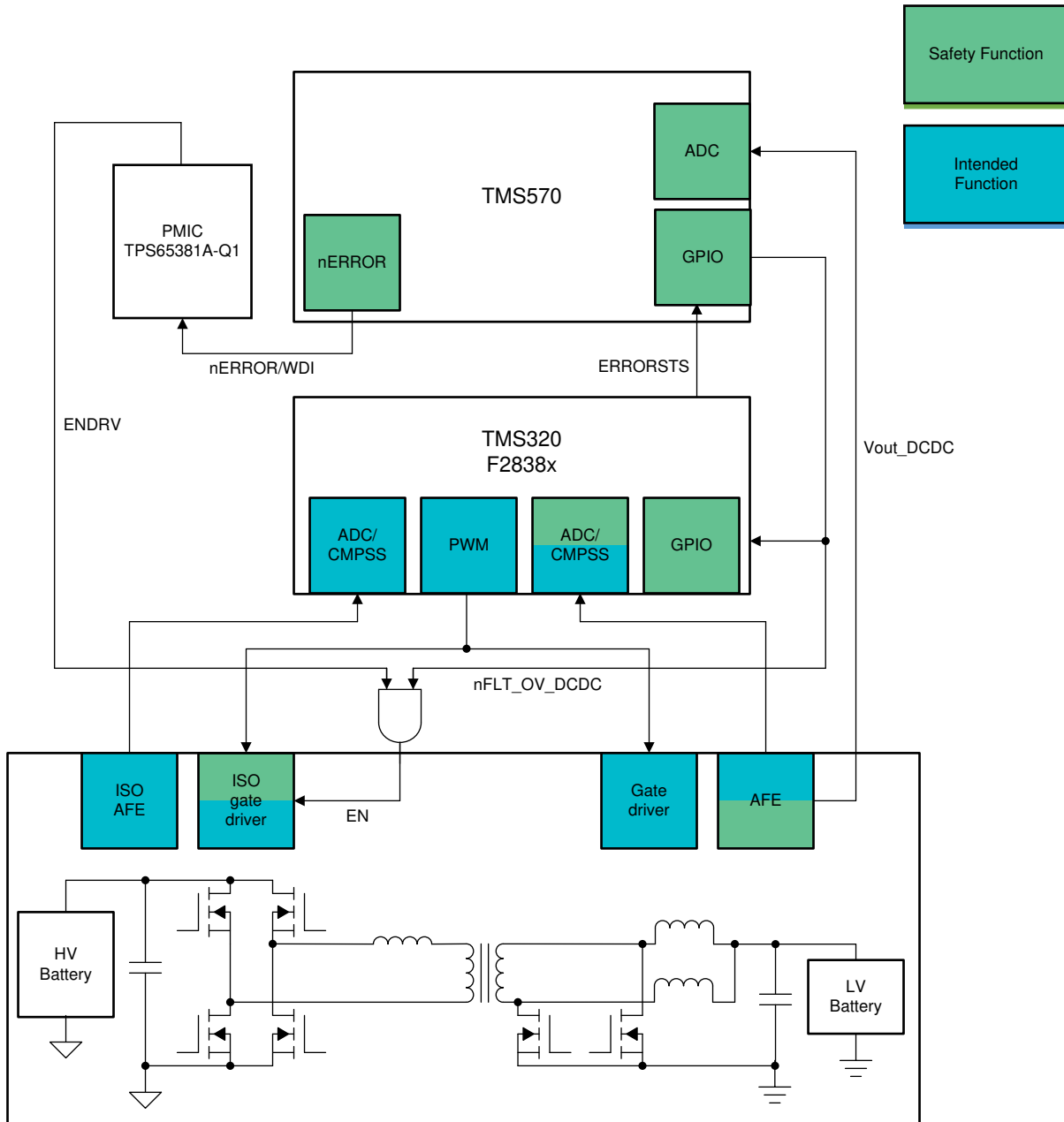


图 3-26. 直流/直流系统方框图

一个完全组装好的逆变器模块如图 3-27 所示。各个子模块的详细信息将在后续几节中讨论。



图 3-27. 直流/直流转换器模块

3.1.1.3.1 直流/直流转换器主板

直流/直流子系统按照设计可以接受 400V 正常高压输入。在输入滤波器和电容器之后，该子系统可以驱动一个 SiC 全桥，并且在左侧滞后中心点与主变压器初级之间有一个电感器。变比为 100:1 的电流互感器用于 PCMC 控件的初级电感器电流感测。主变压器的特性如表 3-6 所示。

表 3-6. 主变压器特性

项目	L (1-2) @100kHz/1V (μ H)	L (1-2) @15A (μ H)	L (1-2) DCR (m Ω)	介电强度/ Hi-pot (Vac) :
VI-19152B	3.1 (典型值)	3.1 (典型值)	2.0 (典型值)	2500

次级采用倍流器拓扑设计，每个滞后有 4 个并联的 MOSFET，用于传输低压输出端的大电流。输出电流用一组并联分流电阻器进行测量。负输出在 PCB 上有一条很长的路径并具有大电流，因此设计了一个大电流汇流条，用以在 MOSFET 和输出端子（安装在电路板的背面）之间传输电流。

3.1.1.3.2 直流/直流栅极驱动器模块

直流/直流转换器的隔离式栅极驱动模块设计为单独子卡，用于驱动高压半桥。这是为了缩短电源与栅极驱动器次级电路之间的接触长度并降低布线复杂性。该模块的设计采用了 UCC21530-Q1 隔离式半桥栅极驱动器和 SN6505-Q1 隔离式电源驱动器。UCC21530 支持使能功能，该功能允许 MCU 禁用独立于 PWM 输出的功率级。隔离式电源设计有第二层使能功能，旨在生成 +15V 和 -4V 的栅极驱动电压，用于为初级全桥选择的 SiC MOSFET。电源的设计基于稳定的 5V 输入，无次级调节。电路板如图 3-28 所示。

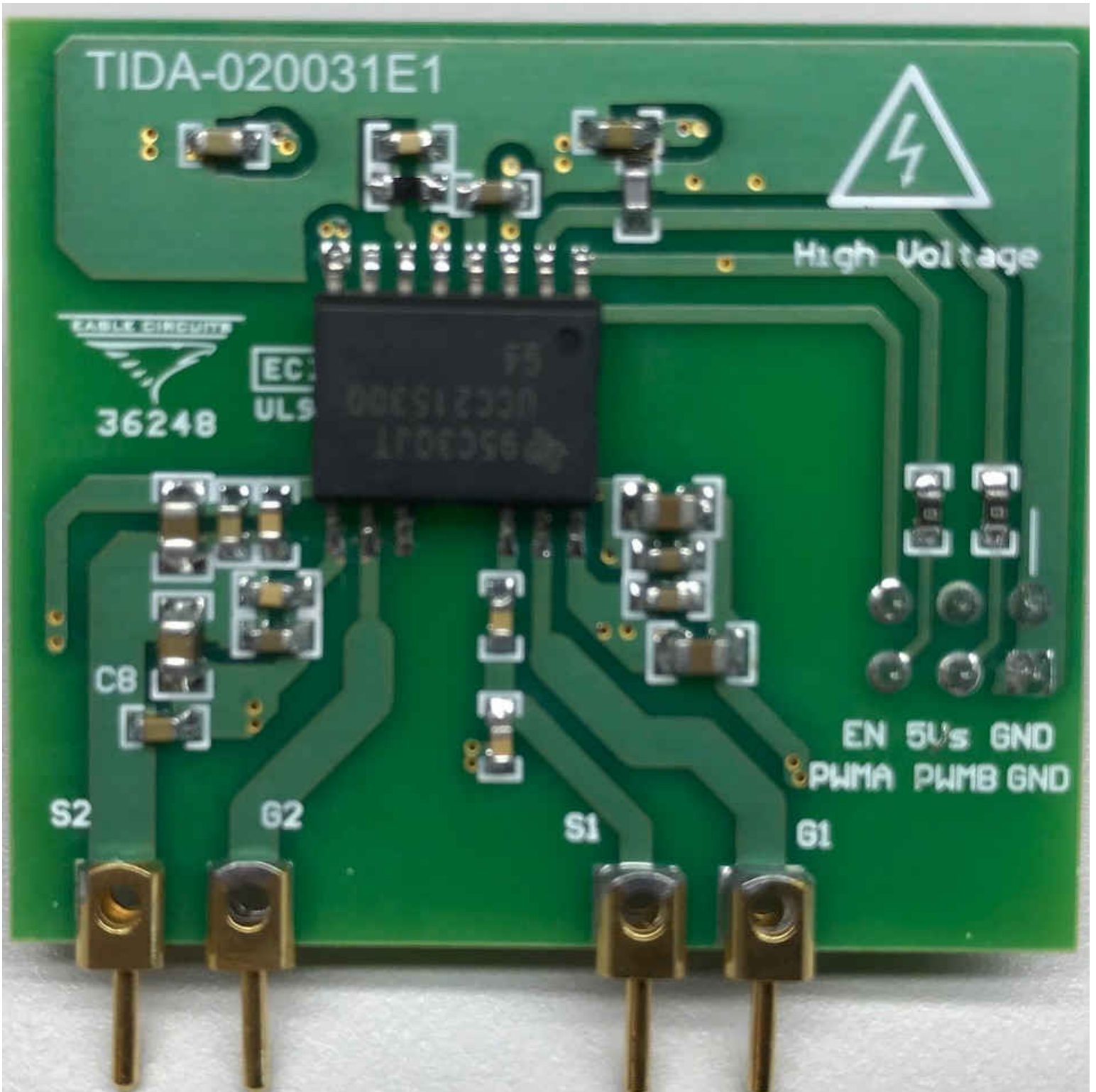


图 3-28. 直流/直流隔离式栅极驱动器

3.2 资源映射

本节介绍了 C2000 和安全 MCU 用于目标功能的引脚映射。

表 3-7. C2000 MCU 数字信号功能映射

信号名称	MCU GPIO	与 GPIO 相连的 MCU 外设	功能
IN+A	0	EPWM 1A	逆变器 A 相高侧的 PWM
IN-A	1	EPWM 1B	逆变器 A 相低侧的 PWM
IN+B	2	EPWM 2A	逆变器 B 相高侧的 PWM
IN-B	3	EPWM 2B	逆变器 B 相低侧的 PWM
IN+C	4	EPWM 3A	逆变器 C 相高侧的 PWM
IN-C	5	EPWM 3B	逆变器 C 相低侧的 PWM
PWMA	6	EPWM 4A	直流/直流初级 A 相高侧的 PWM
PWMB	7	EPWM 4B	直流/直流初级 A 相低侧的 PWM
PWMC	8	EPWM 5A	直流/直流初级 B 相高侧的 PWM
PWMD	9	EPWM 5B	直流/直流初级 B 相低侧的 PWM
PWME	10	EPWM 6A	直流/直流次级侧 A 的 PWM
PWMF (选项-1)	11	EPWM 6B	直流/直流次级侧 B 的 PWM
PWMF (选项-2)	12	EPWM 7A	直流/直流次级侧 (备用) 的 PWM
DC_DC_ENABLE	13	GPIO	启用直流/直流
旋转变压器励磁 (选项)	14	EPWM 8A	旋转变压器载波励磁的 PWM
C2K_SoC_SYNC	15	GPIO	从 C2000 同步到 ADCSoC 的 SMCU
SDI	24	SPIB-SIMO	通过 SPI 连接到 UCC5870 栅极驱动器
SDO	25	SPIB-SOMI	通过 SPI 连接到 UCC5870 栅极驱动器
CLK	26	SPIB-CLK	通过 SPI 连接到 UCC5870 栅极驱动器
nCS	27	SPIB-STE	通过 SPI 连接到 UCC5870 栅极驱动器
TP10	35	GPIO/输出 XBAR	用于监控的测试点
TP9	36	GPIO/输出 XBAR	用于监控的测试点
TP8	37	GPIO/输出 XBAR	用于监控的测试点
TP7	38	GPIO/输出 XBAR	用于监控的测试点
CTRL	41	GPIO	旋转变压器 - 模拟多路复用器控制
VinvA	48	GPIO	逆变器输出 A 数字状态
VinvB	96	GPIO	逆变器输出 B 数字状态
VinvC	98	GPIO	逆变器输出 C 数字状态
FSITX_D0	49	FSI	连接 ETAS/JTAG 接头的接口
FSITX_D1	50	FSI	连接 ETAS/JTAG 接头的接口
FSITX_CLK	51	FSI	连接 ETAS/JTAG 接头的接口
INH	52	GPIO	旋转变压器 - 模拟多路复用器抑制
OT/SHDN	53	GPIO	旋转变压器 - 励磁放大器 ALM2403 状态
QEPA	54	QEP/SPI	QEP 或 SPI 的测试端口 (可选)
QEPB	55	QEP/SPI	QEP 或 SPI 的测试端口 (可选)
QEPS	56	QEP/SPI	QEP 或 SPI 的测试端口 (可选)
QEPI	57	QEP/SPI	QEP 或 SPI 的测试端口 (可选)
PMIC_DRVEN	58	GPIO	来自 SMCU 的 FuSa 信号
nSTB	60	CAN	CAN 接口

表 3-7. C2000 MCU 数字信号功能映射 (continued)

信号名称	MCU GPIO	与 GPIO 相连的 MCU 外设	功能
TxD	61	CAN	CAN 接口
RxD	62	CAN	CAN 接口
C2K PS EN	64	GPIO	5V IPS 启用 (中间电源)
Clr_OXP_latch	66	GPIO	清除 ABE 上的 OCP/OVP 锁存故障
OVP_latch	68	GPIO	ABE 中的 OVP 锁存故障
SCI - C2K_TX - SM_RX	70	SCI	与 SMCU 的串行通信
SCI - C2K_RX - SM_TX	71	SCI	与 SMCU 的串行通信
OVP	74	GPIO	热侧感测中的 OVP
OTP_Latch	78	GPIO	ABE 中的 OTP 锁存故障
OCP_Latch	82	GPIO	ABE 中的 OCP 锁存故障
ASC_EN	86	GPIO	为 UCC5870 驱动器启用 ASC
ASC_L	88	GPIO	UCC5870 的 ASC 低侧控制
ASC_H	90	GPIO	UCC5870 的 ASC 高侧控制
nFLT2_L	92	GPIO	低侧 UCC5870 的次级故障状态
nFLT1_L	94	GPIO	低侧 UCC5870 的初级故障状态
nFLT2_H	127	GPIO	高侧 UCC5870 的次级故障状态
nFLT1_H	147	GPIO	高侧 UCC5870 的初级故障状态

表 3-8. C2000 MCU 模拟信号功能映射

信号名称	模拟通道	功能
TP2	A0	通用 DAC
TP1	A1	通用 DAC
VdcFbk	A2	高压直流反馈信号
VREF1/2	A3	旋转变压器正弦/余弦电平转换
Ifb_A	A4	逆变器相电流 A
Temp2	A5	直流/直流变压器温度
CT_OUT	A14	直流/直流初级侧 CT 电流
Vfb_Vo2	B0	直流/直流次级输出电压
EXC	B1	旋转变压器载波励磁 DAC
Vfb_Io/Vfb_Io2	B2	直流/直流次级电流
Vfb_Io	B3	直流/直流次级电流
NTC	B4	来自 NTC 的旋转变压器温度
Temp1	B5	直流/直流散热器温度
Ifb_C	C2	逆变器相电流 C
Vdc2Fbk	C3	高压直流冗余反馈信号
OEXC	C4	旋转变压器励磁反馈
OCOS	C5	旋转变压器余弦反馈
Ifb_B	D0	逆变器相电流 B
Vfb_Vo	D2	直流/直流次级输出电压
ToPOT	D3	来自电位器的通用外部输入
OSIN	D5	旋转变压器正弦反馈

表 3-9. TMS570LS1227 数字信号功能映射

信号名称	GPIO	与 GPIO 相连的外设	功能
nFLT2_H	0		高侧 UCC5870 的次级故障状态
nFLT2_L	1		低侧 UCC5870 的次级故障状态
nFLT1_H	2		高侧 UCC5870 的初级故障状态
nFLT1_L	3		低侧 UCC5870 的初级故障状态
OTP_Latch	4		ABE 中的 OTP 锁存故障
OCP_Latch	5		ABE 中的 OCP 锁存故障
OVP	6		保护逻辑中的 OVP
ASC_H	7		UCC5870 的 ASC 高侧控制
ASC_L	8		UCC5870 的 ASC 低侧控制
ASC_EN	9		为 UCC5870 驱动器启用 ASC
PM_MUXA	10		电源监控器模拟多路复用器选择 A
PM_MUXB	11		电源监控器模拟多路复用器选择 B
MUX_INH	85		电源监控器模拟多路复用器抑制
CAN_GPO2	12		TCAN4550 接口
CAN_GPO1	14		TCAN4550 接口
CAN_nINT	15		TCAN4550 接口
SPI_MOSI	16	SPI	TCAN4550 接口
SPI_MISO	17	SPI	TCAN4550 接口
SPI_CLK	18	SPI	TCAN4550 接口
SPI_CS	19	SPI	TCAN4550 接口
GPIO_RST	33		TCAN4550 接口
SM PS EN	23		5V IPS 启用 (中间电源)
C2K_RST	24		复位 C2000 MCU
VinvA	25	ECAP	逆变器输出 A 数字状态
VinvB	48	ECAP	逆变器输出 B 数字状态
VinvC	49	ECAP	逆变器输出 C 数字状态
SCI - C2K_TX - SM_RX	28	UART	与 C2K 的 SCI 通信
SCI - C2K_RX - SM_TX	29	UART	与 C2K 的 SCI 通信
RxD2	30	CAN	CAN 接口
TxD2	31	CAN	CAN 接口
nSTB2	34	CAN	CAN 接口
C2K_SoC_SYNC	32		从 C2K 同步到 SoC
DC_DC_ENABLE	59		启用直流/直流
Clr_OXP_latch	60		清除 ABE 上的 OCP/OVP 锁存故障
C2K_ERRSTS	86		来自 C2K 的错误状态信号
EN_DRV	87		PMIC 信号

表 3-10. 安全 MCU 模拟信号功能映射

信号名称	模拟通道	功能
VdcFbk	ADINA0	高压直流反馈信号
Ifb_A	ADINA1	逆变器相电流 A
NTC	ADINA2	来自 NTC 的旋转变压器温度
OSIN	ADINA3	旋转变压器正弦反馈

表 3-10. 安全 MCU 模拟信号功能映射 (continued)

信号名称	模拟通道	功能
1-COM	ADINA4	电源监控器模拟多路复用器 COM1
I _{fb_B}	ADINB0	逆变器相电流 B
I _{fb_C}	ADINB1	逆变器相电流 C
OEXC	ADINB2	旋转变压器励磁反馈
OCOS	ADINB3	旋转变压器余弦反馈
2-COM	ADINB4	电源监控器模拟多路复用器 COM2
V _{dc2Fbk}	ADINB5	高压直流冗余反馈信号
V _{fb_Vo2}	ADINB6	直流/直流次级输出电压
V _{fb_Vo}	ADINB7	直流/直流次级输出电压

3.3 测试设置

未列入清单但评估时需要用到的项目如下：

1. 用于驱动控制电子设备的电源 (或 12V 电池)
2. 牵引电机
3. 高压直流电源
4. 大电流电子负载

3.4 测试结果

牵引逆变器使用直流输入为 450V 的 3 极对内部永磁同步磁阻电机 (IPM-SynRM) 进行了测试。电机可以在 50A 电流下以 17,000RPM 的转速运行，并可以在高达 200A 的相电流下以高达 20,000RPM 的转速运行。

高压转低压直流/直流转换器的效率在 400V 输入和 12V 输出条件下且输出电流高达 150A 时测得。同步整流 (SR) 方案已启用。峰值效率约为 95.5%。

4 通用德州仪器 (TI) 高压评估 (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。

术语 TI HV EVM 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。

- 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）或者用带有互锁机构的透明塑料箱装好 EVM，避免意外接触。

安全使用限制条件：

不会将 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

若要下载原理图，请参阅 [TIDM-02009](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

若要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDM-02009](#) 中的设计文件。

5.2 软件

若要下载软件文件，请参阅 [TIDM-02009](#) 中的设计文件。

5.3 文档支持

相关文档：

- 德州仪器 (TI)，[双向直流/直流转换器](#) 参考设计。
- 德州仪器 (TI)，[相移全桥直流/直流电源转换器](#) 参考设计。
- 有关功能安全概念文档或安全概念的 TUV 技术报告，请向您当地的 TI 销售代表索要。

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

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

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 关于作者

HAN ZHANG 自 2019 年起担任德州仪器 (TI) C2000 汽车系统解决方案团队的系统工程师，主要从事混合动力汽车/电动汽车动力总成系统和功能安全领域的参考解决方案开发和客户支持方面的工作。在加入系统解决方案团队之前，Han 在 C2000 功能安全团队工作，负责支持器件安全认证和 C28x CPU 自测库的开发。在 2018 年加入 TI 之前，Han 于 2017 年获得俄亥俄州克利夫兰州立大学的电气工程博士学位，并于 2010 年获得中国清华大学工程学士学位。

RAMESH RAMAMOORTHY 自 2011 年以来一直担任德州仪器 (TI) C2000 系统解决方案组的高级系统工程师，致力于电机控制应用的研究，以及家电、工业伺服和电动汽车/混合动力汽车牵引驱动领域的参考解决方案开发。在之前的工作中，Ramesh 曾担任电机驱动研发工程师，开发了当时十分先进的电机驱动解决方案，并以应用工程师身份为家电市场开发了大量参考设计。他于 1993 年在印度钦奈的印度理工学院获得电气工程硕士学位，此后一直致力于研究各种电机的控制。

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