

Design Guide: TIDA-020106

机电制动 (EMB) 参考设计



说明

机电制动 (EMB) 是一种新型制动技术，旨在实现汽车的电气化和智能，为高级自动驾驶提供更低的总体成本、更快的响应和更精确的操作。该参考设计展示了一种完整的功能 EMB 设计。本指南中说明了硬件、软件和功能安全设计。由于电动助力转向 (EPS) 与 EMB 的关键元件非常相似，因此该参考设计也适用于 EPS。

资源

TIDA-020106、C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK	设计文件夹
DRV3263-Q1、DRV3233-Q1	产品文件夹
F29P32、TPS653860-Q1	产品文件夹
DRV8263-Q1、DRV8243-Q1	产品文件夹
LM68645-Q1、LM74930-Q1	产品文件夹
TCAN1043H-Q1	产品文件夹

特性

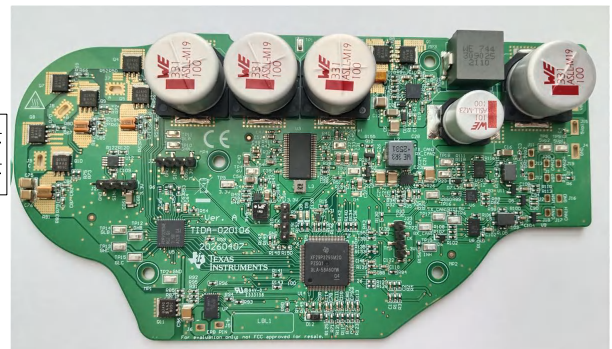
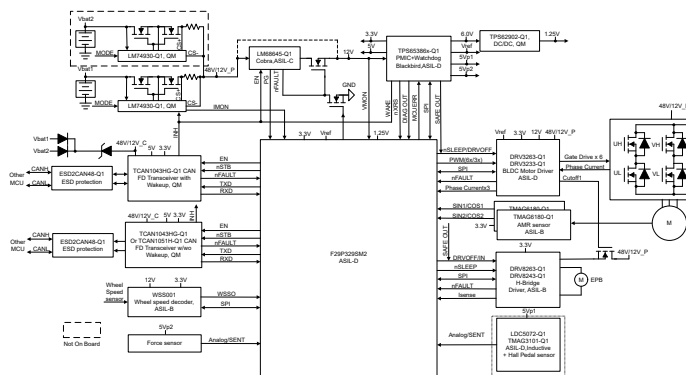
- 48V/12V 兼容设计
- 兼容 ASIL-D 的设计
- 灵活的分立式元件设计
- $100\mu\text{A}$ 的待机功耗
- 支持电子驻车制动 (EPB)
- 支持踏板和压力传感器接口
- 支持高达 500W 的 BLDC 电机
- 158mm × 83mm × 20mm 紧凑型电路板尺寸

应用

- [机电制动 \(EMB\)](#)
- [电动助力转向 \(EPS\)](#)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

机电制动 (EMB) 是一种新型制动技术，旨在实现汽车电气化和智能。与目前主流的电子液压制动器 (EHB) 相比，EMB 实现了“干式”制动方法，该方法在结构上进行了创新，取消了制动液、液压管路、真空增压器和其他相关器件。这些优势包括减轻车辆重量、节省后续维护以及释放底盘空间。此外，响应时间为 80 至 100 毫秒，比 EHB 快了约一倍，显著缩短了制动距离。电机直接控制 EMB，从而提供更精确的操作，这也有利于实现高级自动驾驶所需的精确控制。该参考设计展示了一种 EMB 设计。本指南中说明了硬件、软件和功能安全设计。

1.1 术语

EMB	机电制动
BLDC	无刷直流
BEMF	反电动势
PWM	脉宽调制
FET、MOSFET	金属氧化物半导体场效应晶体管
PLL	锁相环
RMS	均方根
MTPA	每安培最大扭矩
FWC	弱磁控制
FOC	场定向控制
CMPSS	比较器子系统

1.2 主要系统规格

表 1-1 中列出了 TIDA-020106 规格。

表 1-1. 主要系统规格

参数	测试条件	最小值	标称值	最大值	单位
系统输入特性					
输入电压 (V_{DC})	48V 型号	32	48	60	VDC
输入电压 (V_{DC})	12V 型号	6	12	20	VDC
空载待机功耗 (P_{NL})	$V_{DC} = 48V, I_{out} = 0A$	-	1.5	-	W
输入电流 (I_{IN})	$V_{INDC} = 48V, P_{out} = P_{MAX}$	-	12	-	A
电机逆变器特性					
PWM 开关频率 (f_{SW})	-	-	20	-	kHz
额定输出功率 (P_{OUT})	$V_{INDC} = 48V$	-	500	-	W
输出电流 (I_{RMS})	$V_{INDC} = 48V$	-	16	-	A
逆变器效率 (η)	$V_{INDC} = \text{标称值}, P_{OUT} = \text{标称值}$	-	96	-	%
电机电频率 (f)	$V_{INAC} = \text{最小值至最大值}$	20	200	1000	Hz
故障保护	过流、恢复失速、欠压、过压				
驱动控制方法和功能	具有位置传感器的 FOC				
工作环境	开放式框架	-25	25	75	°C
电路板尺寸	长 × 宽 × 高	158mm × 83mm × 20mm			mm ³

警告

TI 建议该参考设计仅在实验室环境中运行，不应将该器件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到的高电压。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。

表面高温！ 接触会导致烫伤。**请勿触摸！** 电路板上电后，某些元件可能会达到 **55°C** 以上的高温。由于存在高温，在使用过程中或使用刚结束时，用户不得触摸电路板。

小心

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。

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。

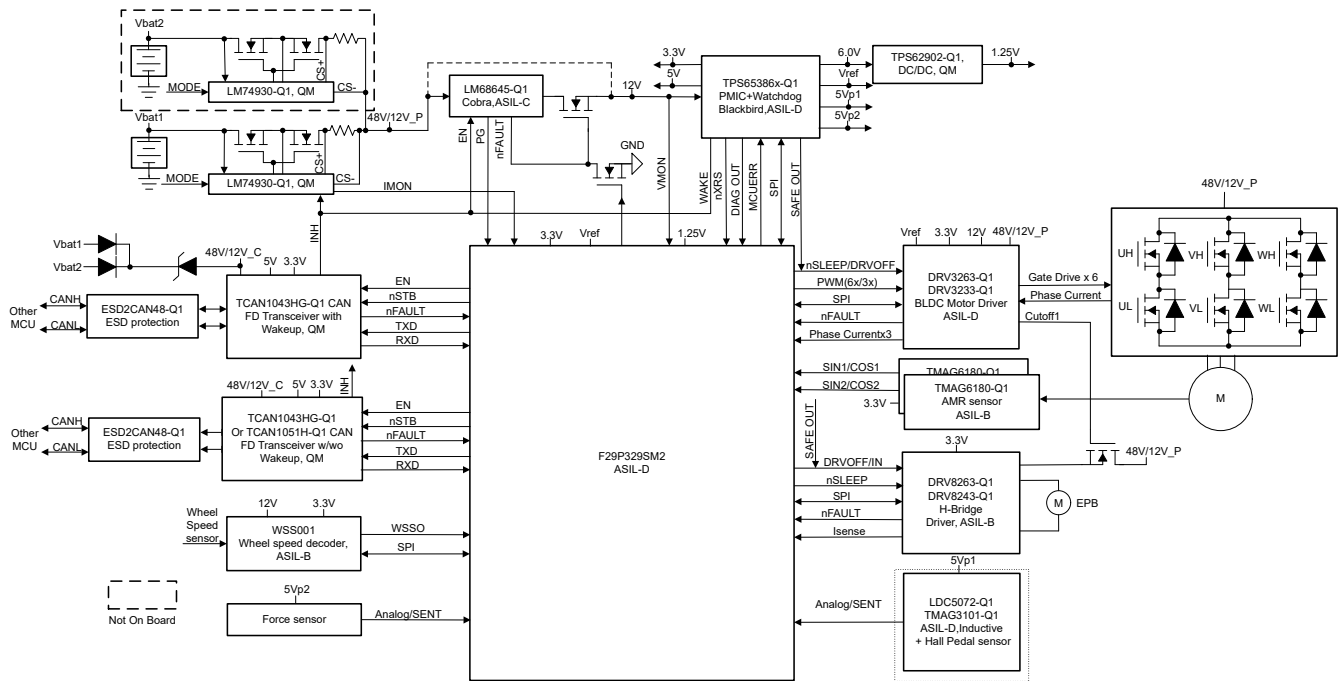


图 2-1. TIDA-020106 EMB 方框图

整个系统可分为七个块：

- 理想二极管
- 48V 至 12V 直流/直流转换
- PMIC
- BLDC 电机驱动器
- EPB 驱动器
- 轮速传感器解码器
- CAN 收发器
- F29P32 DSP
- 力传感器接口
- 踏板传感器接口

2.2 设计注意事项

该设计演示了完整的 EMB 设计，包括电源树、DSP、电机驱动器、WSS 解码、CAN 收发器和功能安全。硬件设计文件可在 ti.com 上获取。

2.3 重点产品

本参考设计采用了以下重点产品。以下各节介绍为该参考设计选择器件时应考虑的主要特性。如需了解有关重点器件的更多详细信息，请参阅各自的产品数据表。

2.3.1 F29P32X

F29H85x、F29P58x 和 F29P32x 都属于 C2000™ 实时微控制器系列，该系列为可扩展、超低延迟 MCU，旨在提高电力电子设备和电机控制等器件的效率，包括但不限于：高功率密度、高开关频率。F29 产品系列采用下一代 C29 CPU 内核，性能是上一代 C28 CPU 内核的 2 倍，在业界处于领先地位。C29 内核还支持字节寻址，其数据

类型与其他常见的 CPU 架构 (包括 Arm™ 架构) 完全兼容, 可为希望快速上市的客户实现平稳迁移。如需更多信息, 请参阅 [C29 CPU - 借助 C2000 MCU 上的优化架构提供出色的实时性能](#) 技术白皮书。

2.3.2 LM74930-Q1

LM74930-Q1 理想二极管控制器可驱动和控制外部背对背 N 沟道 MOSFET, 从而模拟理想二极管整流器和电源路径开/关控制, 并提供过流和过压保护功能。4V 至 65V 的宽输入电源电压可保护和控制 12V 和 24V 汽车类电池供电的 ECU。该器件可以承受低至 -65V 的负电源电压并保护负载免受这些电压的影响。集成式高侧栅极控制 (HGATE) 可驱动电源路径中的第一个 MOSFET。该器件使用 HGATE 控制功能在发生过流、过压和欠压事件时允许负载断开 (开/关控制), 同时理想二极管控制器 (DGATE) 可驱动第二个 MOSFET 来代替肖特基二极管, 从而通过阻止反向电流从输出端流到输入端来实现输入反极性保护和输出电压保持。该器件具有集成的电流检测放大器, 通过断路器功能提供可调节的过流和短路保护。该器件具有可调节过压和欠压保护功能, 可防止电源瞬变。LM74930-Q1 有一个 MODE 引脚可用于选择性地启用或禁用反向电流阻断功能。

2.3.3 WSS001

WSS001 器件是一款单通道轮速接口芯片, 专为严酷的汽车环境下使用而设计, 且仅需极少的外部元件。具有可配置的轮速检测输入, 能够处理有源传感器。该器件有五种解码模式, 可对 2 级、3 级 AK 协议和 3 级高分辨率 AK 协议传感器进行解码。WSS001 从 WSSO 输出传感器速度信号, 以供 MCU 测量轮速; 传感器信号解码结果存储在可通过 SPI 访问的内部寄存器位中。

WSS001 器件采用 32 位 SPI 协议进行通信。I/O 引脚接受 5V 和 3.3V 供电。

2.3.4 LM68645-Q1

LM686x5-Q1 是一个汽车级降压转换器系列, 专为实现高效率、高功率密度及超低电磁干扰 (EMI) 而设计。该系列转换器在 3V 至 65V (70V 瞬态电压 < 100ms) 的宽输入电压范围内工作, 减少了对外部输入浪涌保护的需求。LM686x5-Q1 提供可通过引脚选择的 3.3V 和 5V 固定输出电压, 也可以采用可调节配置。得益于超小的环路电感和优化的开关节点压摆率, 可实现低 EMI 运行。电流模式控制架构, 搭配 30ns 典型最短导通时间, 可在高频下实现高转换比, 同时提供快速瞬态响应以及出色的负载和线路调整。自动模式可在轻负载运行时启用频率折返, 从而将空载电流消耗降至仅 2.5 μ A (典型值), 并在轻负载下实现高效率, 这有效延长了电池供电系统的工作时长。

2.3.5 TPS653860-Q1

TPS65386x-Q1 器件是一款多轨电源, 旨在为安全相关应用中的微控制器、传感器、收发器和外设供电

2.3.6 DRV3263-Q1

DRV3263-Q1 是一款集成式智能栅极驱动器, 适用于 48V 汽车类三相 BLDC 应用。此器件具有三个半桥栅极驱动器, 每个驱动器都能够驱动高侧和低侧 N 沟道功率 MOSFET。DRV3263-Q1 使用外部 12V 电源和集成式自举二极管为高侧 MOSFET 生成合适的栅极驱动电压。涓流电荷泵使栅极驱动器能够支持 100% PWM 占空比控制, 并提供外部开关的过驱栅极驱动电压, 这些开关可以通过专用的关断驱动器引脚进行控制。

DRV3263-Q1 提供低侧电流检测放大器, 用于支持基于电阻器的低侧电流检测。放大器的低失调电压和低增益误差使系统能够实现精确的电机电流测量。

DRV3263-Q1 集成了各种诊断和保护功能, 这使得电机驱动系统的设计更加稳健, 并减少了外部元件的数量。该器件具有高度可配置特性, 能够无缝集成到各种系统设计中。

2.3.7 DRV3233-Q1

DRV3233-Q1 是一款集成式智能栅极驱动器, 适用于 12V 和 24V 汽车级三相 BLDC 应用。此器件具有三个半桥栅极驱动器, 每个驱动器都能够驱动高侧和低侧 N 沟道功率 MOSFET。DRV3233-Q1 使用集成自举二极管和 GVDD 电荷泵生成合适的栅极驱动电压。此智能栅极驱动架构支持 0.8mA 至 1A (拉电流) 和 2A (灌电流) 的可配置峰值栅极驱动电流。DRV3233-Q1 由单一电源供电, 支持 4.5V 至 60V 的宽输入范围。涓流电荷泵可实现 100% PWM 占空比控制, 并为外部开关提供过驱电源电压。

DRV3233-Q1 提供低侧电流检测放大器, 用于支持基于电阻器的低侧电流检测。放大器的低失调电压使系统能够实现精密的电机电流测量。

DRV3233-Q1 集成了各种诊断和保护特性，可实现稳健的电机驱动系统设计，还有助于消除对外部元件的需求。该器件具有高度可配置特性，能够无缝集成到各种系统设计中。

2.3.8 DRV8263-Q1

DRV8263-Q1 是一款宽电压、高功率、全集成 H 桥驱动器，适用于 24V 和 48V 汽车应用。该功率封装器件采用 BiCMOS 大功率工艺技术节点设计，提供了出色的电源处理能力和热性能，不仅封装尺寸小巧、易于布局，还可提供 EMI 控制、精确电流检测和诊断功能，稳健性较高。

这些器件集成了 N 沟道 H 桥、电荷泵、高侧电流检测和调节、电流比例输出以及保护电路。集成检测采用电流镜设计，无需分流电阻器，可节省电路板面积并降低系统成本。还提供了一种低功耗睡眠模式，以实现较低静态电流。

器件提供电压监测、负载诊断、过流和过热保护功能。故障情况通过 nFAULT 引脚指示。该器件提供两种型号：HW 接口和 SPI。SPI 型号提供了更高灵活性

2.3.9 DRV8243-Q1

DRV824x-Q1 器件系列是完全集成式 H 桥驱动器，可广泛应用于汽车领域。该器件可配置为单路全桥驱动器或两个独立的半桥驱动器。这种采用 BiCMOS 大功率工艺技术节点设计的单片功率封装器件系统提供了出色的电源处理能力和热性能，不仅封装尺寸小巧、易于布局，还可提供 EMI 控制、精确的电流检测和诊断功能，稳健性较高。该系列提供相同的引脚功能和可扩展的 RON (电流能力)，可支持不同的负载

2.3.10 TMAG6180-Q1

TMAG6180-Q1 是一款基于各向异性磁阻 (AMR) 技术的高精度角度传感器。该器件集成信号调节放大器，并提供与所施加平面磁场的方向相关的差分正弦和余弦模拟输出。该器件还在 X 轴和 Y 轴上具有两个独立的霍尔传感器输出，可用于将传感器的角度范围扩展到 360°。

TMAG6180-Q1 具有宽工作磁场，可实现灵活的机械放置以及低延迟 (1.6μs) 输出，适用于转子位置检测等高速应用。该器件在正弦和余弦输出上具有超低延迟，可大大减少延迟相关角度误差，非常适合高达 100krpm 转子位置检测等高速应用。

TMAG6180-Q1 提供广泛的诊断功能，可满足严格的功能安全汽车和工业要求。该器件可在 -40°C 至 +150°C 的宽环境温度范围内保持稳定一致的性能，同时具有超小的热漂移和寿命误差。

2.3.11 TCAN1043H-Q1

TCAN1043H-Q1 满足 ISO 11898 - 2 (2016) 高速控制器局域网 (CAN) 规范的物理层要求，提供 CAN 总线和 CAN 协议控制器之间的接口。这些器件支持传统 CAN 和 CAN FD 协议，具有最高 2Mbps 的数据速率。器件型号以“G”结尾的器件专为数据速率高达 5Mbps 的 CAN FD 应用而设计。TCAN1043xx-Q1 可以 (通过 INH 输出引脚) 选择性地启用节点上可能存在的各种电源，从而在整个系统级别减少电池电流消耗。这使得在超低电流睡眠状态中，功率传送到除 TCAN1043xx-Q1 以外的所有系统组件，而 TCAN1043xx-Q1 则仍然处于低功耗状态，并对 CAN 总线进行监控。

在总线上检测到唤醒模式或通过 WAKE 输入请求本地唤醒时，TCAN1043xx-Q1 会通过驱动 INH 高电平的方式发起节点启动。TCAN1043xx-Q1 包括通过 VIO 端子实现的内部逻辑电平转换功能，允许直接连接到 3.3V 或 5V 控制器。该器件包含很多保护和诊断功能，包括 CAN 总线短路检测和电池连接检测。TCAN1043xxQ1 满足 IEC 62228-3 和 J2962-2 的 ESD 和 EMC 要求，无需额外增加保护组件。

2.3.12 TCAN1043-Q1

TCAN104x-Q1 满足 ISO 11898 - 2 (2016) 高速控制器局域网 (CAN) 规范的物理层要求，提供 CAN 总线和 CAN 协议控制器之间的接口。这些器件支持传统 CAN 和 CAN FD 协议，具有最高 2Mbps 的数据速率。器件型号以“G”结尾的器件专为数据速率高达 5Mbps 的 CAN FD 应用而设计。TCAN1043xx-Q1 可以 (通过 INH 输出引脚) 选择性地启用节点上可能存在的各种电源，从而在整个系统级别减少电池电流消耗。这使得在超低电流睡眠状态中，功率传送到除 TCAN1043xx-Q1 以外的所有系统组件，而 TCAN1043xx-Q1 则仍然处于低功耗状态，并对 CAN 总线进行监控。

在总线上检测到唤醒模式或通过 WAKE 输入请求本地唤醒时，TCAN1043xx-Q1 会通过驱动 INH 高电平的方式发起节点启动。TCAN1043xx-Q1 包括通过 VIO 端子实现的内部逻辑电平转换功能，允许直接连接到 3.3V 或 5V 控制器。该器件包含很多保护和诊断功能，包括 CAN 总线短路检测和电池连接检测。TCAN1043xxQ1 满足 IEC 62228-3 和 J2962-2 的 ESD 和 EMC 要求，无需额外增加保护组件。

2.3.13 LDC5072-Q1

LDC5072-Q1 是一款模拟前端，适用于面向汽车和工业应用中绝对旋转位置检测的非接触式电感式位置传感器。LDC5072-Q1 用于激励通常印刷在印刷电路板 (PCB) 上的线圈。该激励会通过靠近 PCB 的导电目标耦合回同一 PCB 上的两组接收器线圈。导电目标也可以是印刷在另一个 PCB 上的图案。线圈 PCB 保持静止，目标随电机、执行器或阀门移动。激励线圈会根据目标相对于接收器线圈的位置，在接收器线圈上产生次级电压。通过从接收器线圈中读取电压、对电压进行处理并给出表示目标位置的正弦和余弦分量的模拟输出，可以获得位置的信号表示。

2.4 系统设计原理

此参考设计主要面向 EMB 和 EPS 应用

2.4.1 硬件设计

典型的电机控制板包含多个块：辅助电源、逆变器、电流和电压检测、保护电路以及微控制器。本节将介绍这些设计概念。

2.4.1.1 电源树设计

电源树设计包括理想二极管控制器 LM74930-Q1、48V 至 12V 直流/直流转换器 LM68645-Q1 和 12V PMIC TPS65386x-Q1，如图 2-2 所示。LM74930-Q1 提供输入过压、欠压和过流保护，并允许反向电流为输入电源充电。由于 EMB 电机可在再生模式下工作，因此反向电流路径有助于保护电路板免于过压击穿。

12V 由 F29P329SM2 的内部 CMPSS 进行监测，以防止由于 LM68645-Q1 的任何故障而导致 48V 至 12V 电压轨短路。电压超出设置范围后，CMPSS 就会禁用 TCAN1043H-Q1。然后，TCAN1043H-Q1 的 INH 会关断理想二极管、直流/直流转换器和 PMIC。由于此设计仅用于硬件保护而无需软件，因此保护速度很快。

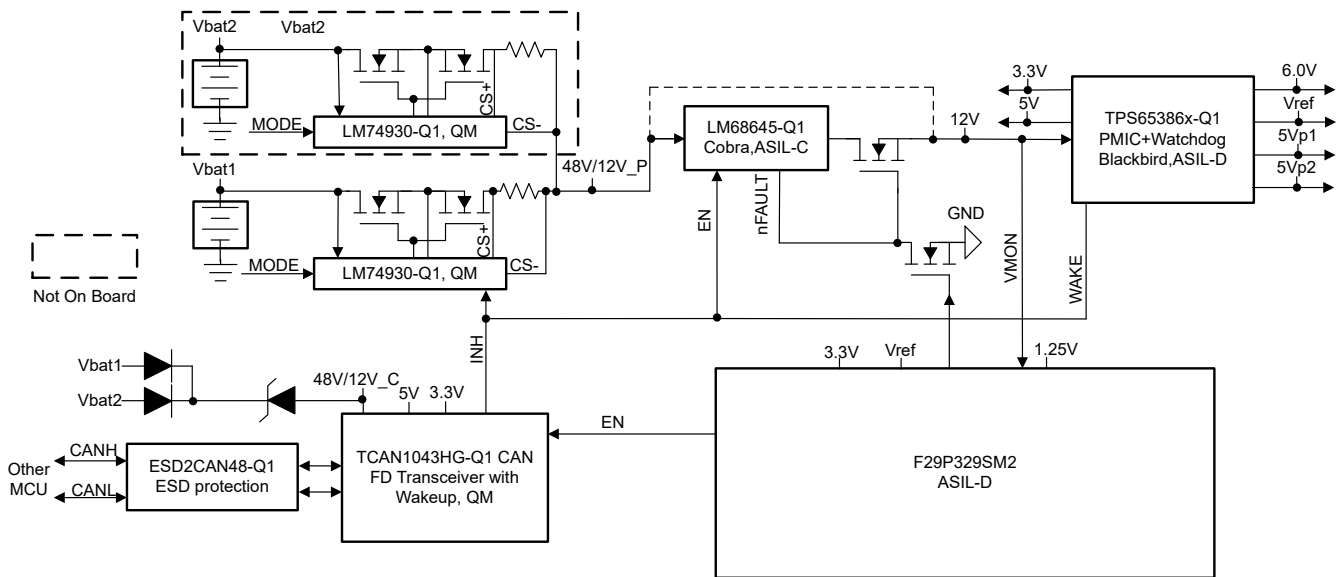


图 2-2. 电源树设计

2.4.1.2 PMIC 设计

TPS653860-Q1 是一款 12V PMIC。此参考设计中有三个 LDO，分别用于为 F29 的 IO 电源生成 3.3V 电压、为 ADC 基准电压生成 3.3Vref 电压以及为 CAN 收发器生成 5V 电压。F29P32 内核电压由降压转换器 TPS62902-Q1 提供。该 PMIC 还具有两个 PLDO，可为力传感器和踏板传感器等非板载传感器提供两个受保护的 5V 电压。图 2-3 显示了对应的原理图。

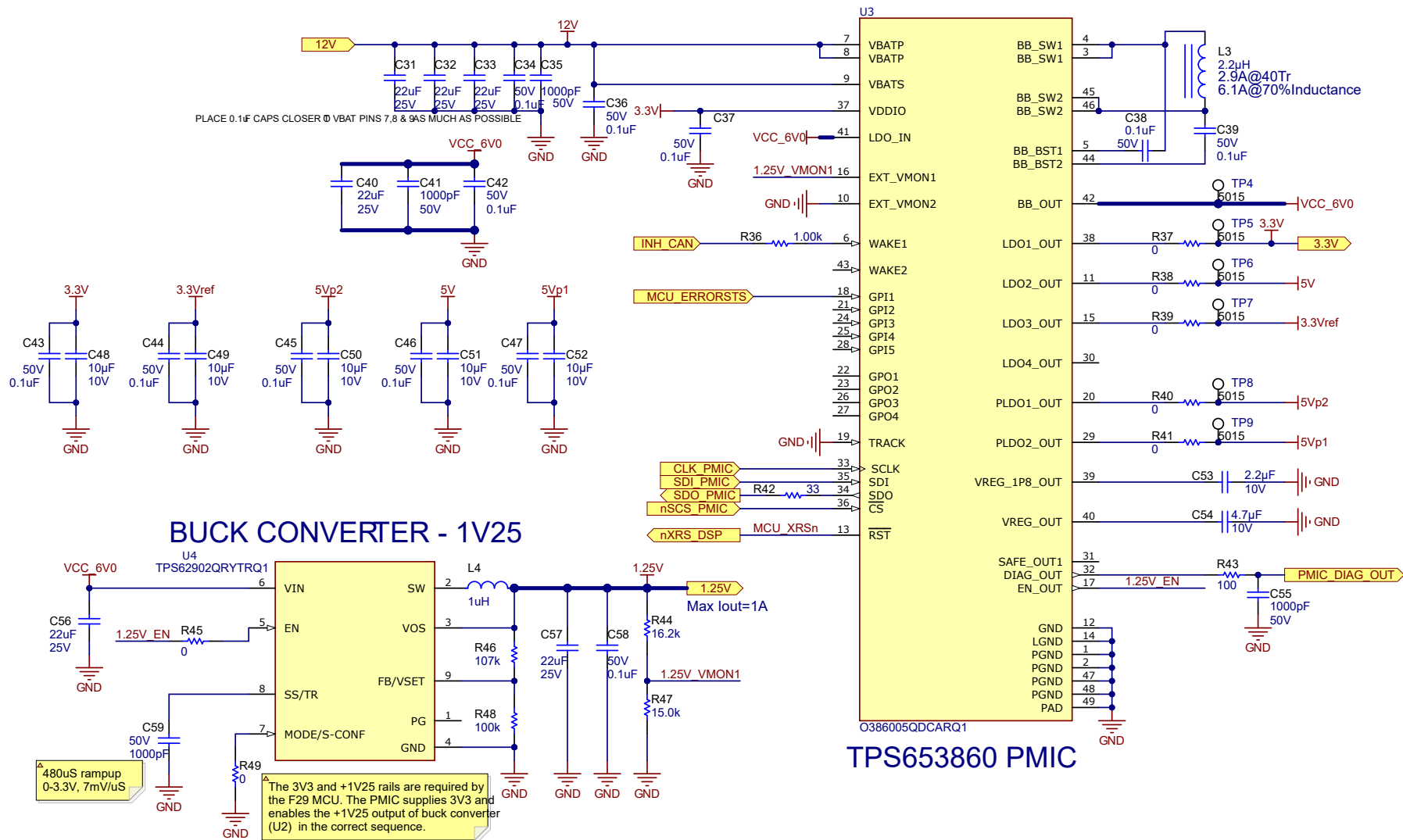


图 2-3. PMIC 设计

2.4.1.3 直流/直流转换器设计

仅 48V 型号需要直流/直流转换器 LM68645-Q1；对于 12V EMB 型号，仅需要 R22 作为跳线，所有其他直流/直流转换器相关元件均可拆除。有关设计，请参阅图 2-4。

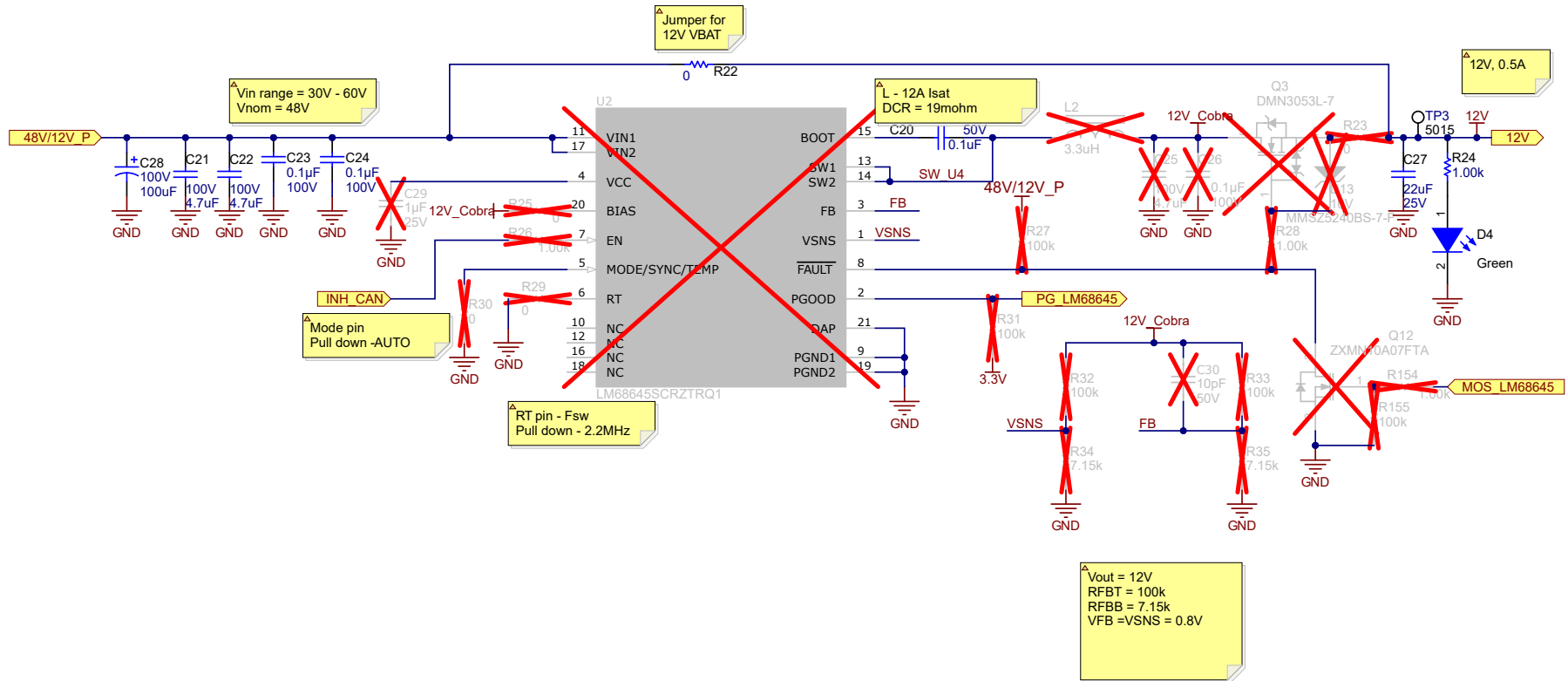


图 2-4. 48V 至 12V 直流/直流转换器

2.4.1.4 电机栅极驱动器设计

此 EMB 参考设计支持 48V 和 12V 电机栅极驱动器 DRV3263-Q1 和 DRV3233-Q1。DRV3233-Q1 有两个切断功能，可用于总线或电机相位切断，而 DRV3263-Q1 没有切断功能，但 VCP 功能可用于提供切断。图 2-5 展示 48V 栅极驱动器设计。

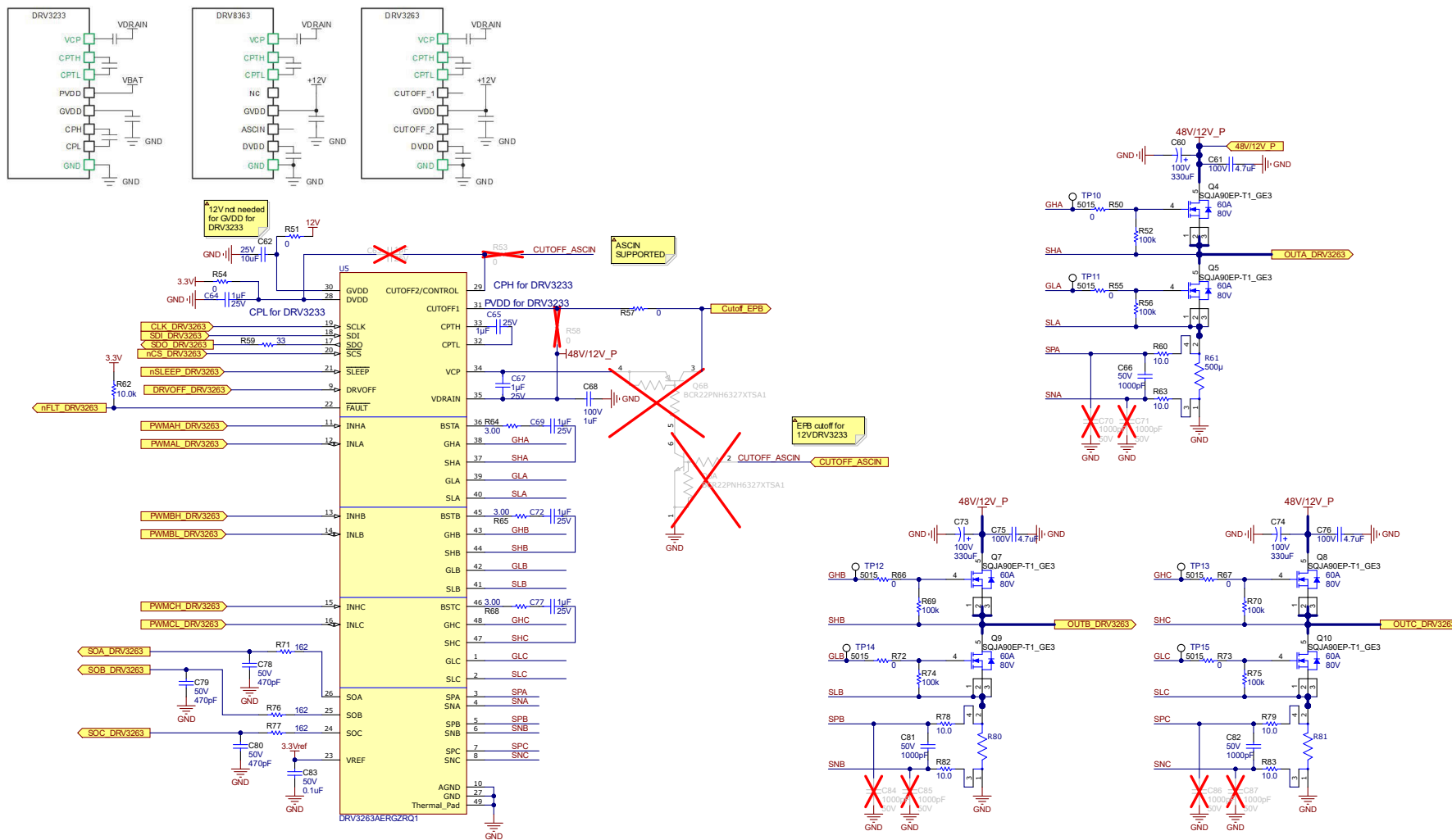


图 2-5. 适用于 48V EMB 的 DRV3263 电机栅极驱动器

图 2-6 展示 12V 栅极驱动器设计。

2.4.1.5 电机相电流检测

DRV3263-Q1 和 DRV3233-Q1 均支持具有内部 PGA 的低侧分流器设计。图 2-5 展示低侧分流器设计

2.4.1.6 F29P32 的过流保护

除了 DRV3263-Q1 和 DRV3233-Q1 具备的过流保护外，F29P32 还具有 CMPSS，可提供额外的电机过流保护。

2.4.1.7 通过 PMIC 提供电机驱动器保护

如果 DSP F29P32 发生故障，PMIC 将通过 SAFE OUT 禁用 BLDC 电机驱动器和 EPB 驱动器。图 2-7 展示该保护逻辑。

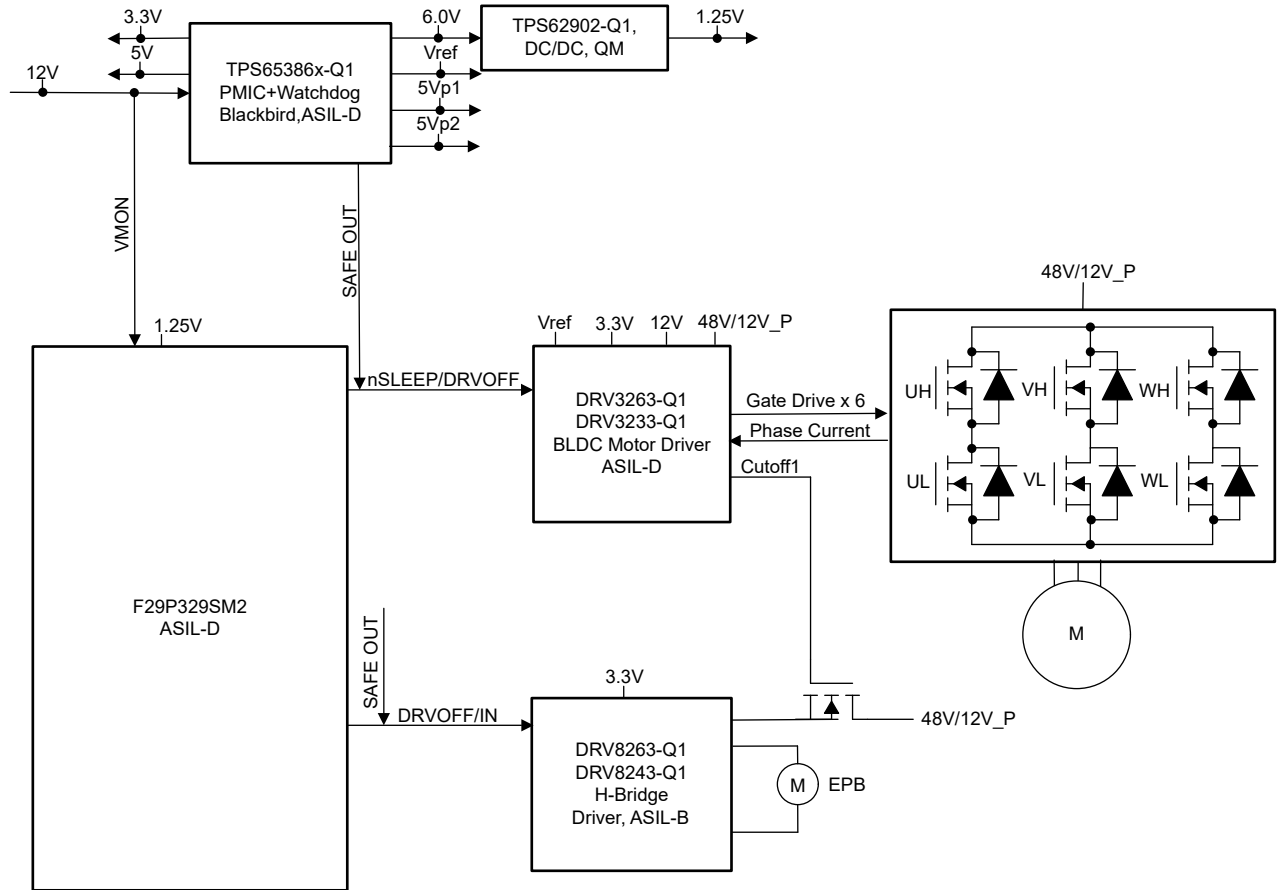


图 2-7. 通过 PMIC 提供电机驱动器保护

2.4.1.8 CAN 收发器设计

由于 48V CAN 收发器并不常见，因此本参考设计支持同时使用 12V 或 48V CAN 收发器。要使用 12V CAN 收发器，请组装 R97；要使用 48V CAN 收发器，请组装 R99。图 2-8 中详细介绍了电机相电流检测设计。

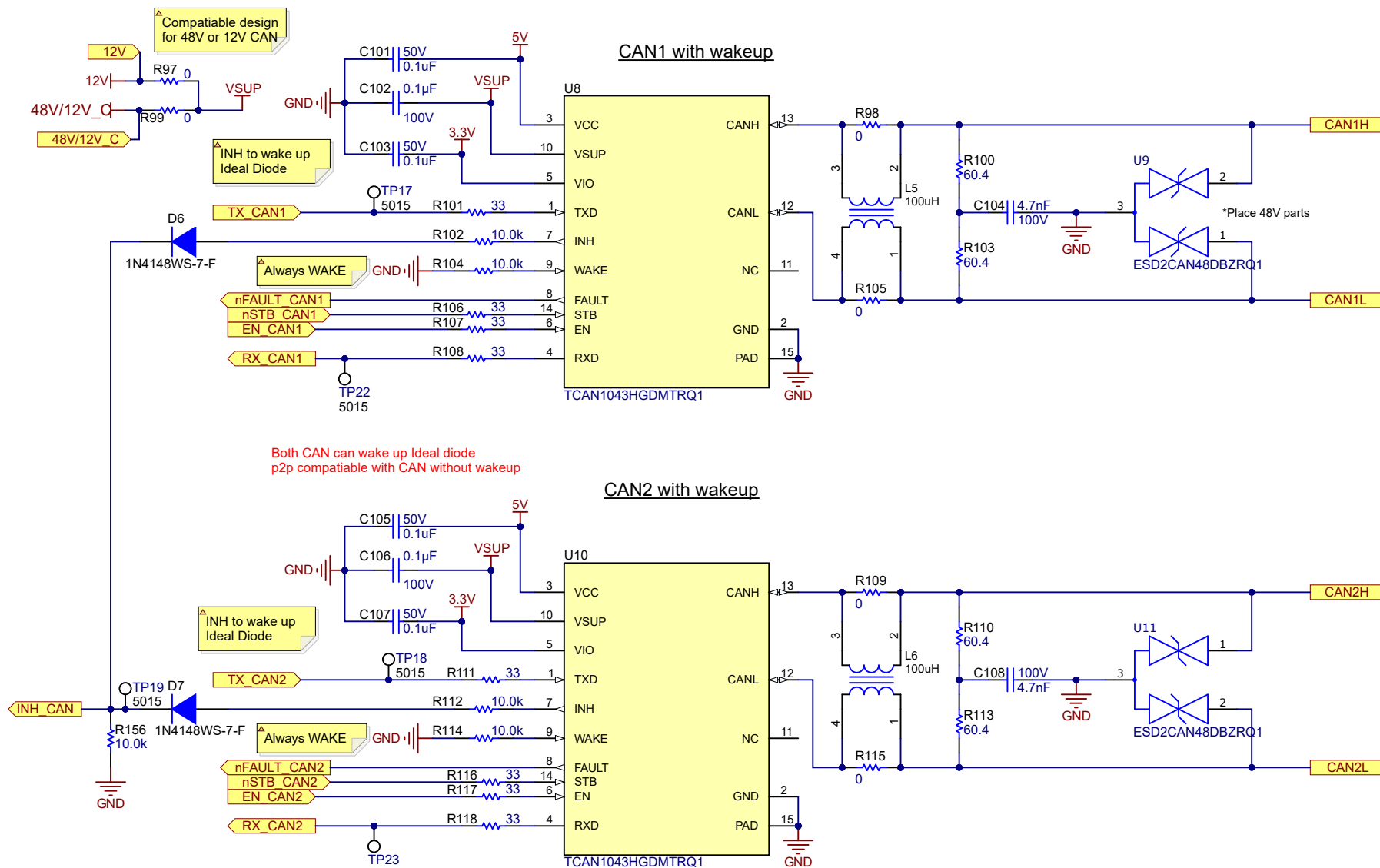


图 2-8. CAN 收发器设计

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 入门硬件

本节详细介绍了参考设计电路板及软件测试和验证所需的设备、测试装置和过程说明。

3.1.1 电路板上电时序

图 3-1 显示了该参考设计的电源树设计。

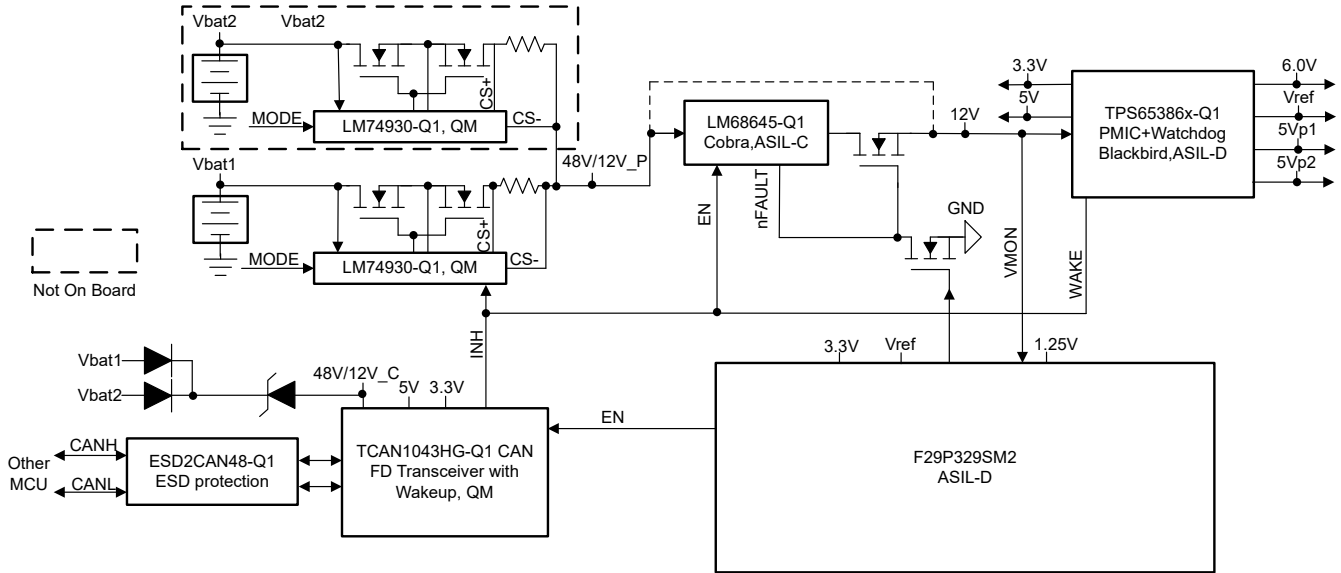


图 3-1. 电源树设计

48V/12V_IN_FILTERED 由理想二极管控制器 LM74930-Q1 进行监测和控制。在上电期间，CAN 收发器 TCAN1043H 的 INH 引脚将保持高电平约 300ms。LM68645-Q1、TPS653860-Q1 和 F29P32 将在这 300ms 时间内启动，然后 F29P32 将 nSTB_CANx 和 EN_CANx 设置为高电平，以确保 CAN 收发器在此 300ms 启动时间后处于使能状态，并且 INH 仍保持高电平。上电后，PMIC 输出如下：

- LDO1 处为 3.3V
- LDO2 处为 5V
- LDO3 处为 3.3V

降压转换器 TTPS62902-Q1 将为 F29P32 内核电压电源生成 1.25V 电压。

TI 建议在使用该板时采取以下预防措施：

警告

- 电路板通电时，请勿触摸电路板的任何部分或连接到电路板的元件。

3.1.2 测试条件

测试参考设计软件时请遵守以下规定：

- 对于输入端，如果使用直流源，电源的电压范围必须为 36VDC 到 58VDC。将输入直流电源的输入电流限制设置为 3A，但在初始电路板启动期间先使用较低的电流限制。
- 对于输出，采用带测力计的三相 PMSM。

3.1.3 电路板验证所需的测试设备

设计人员必须使用以下设备进行电路板验证：

- 隔离式直流电源

- 三相功率分析仪
- 数字示波器
- 万用表
- 直流电源
- 500W、三相 PM 同步电机
- 测力计

3.2 测试结果

以下各节介绍了通过表征设计获得的测试数据。测试结果分为多个部分，涵盖风扇和压缩机电机的稳态性能和数据、功能性能波形以及瞬态性能波形。

3.2.1 PMIC 的上电时序

图 3-2 展示 PMIC 和 1.25V 直流/直流转换器的上电时序。

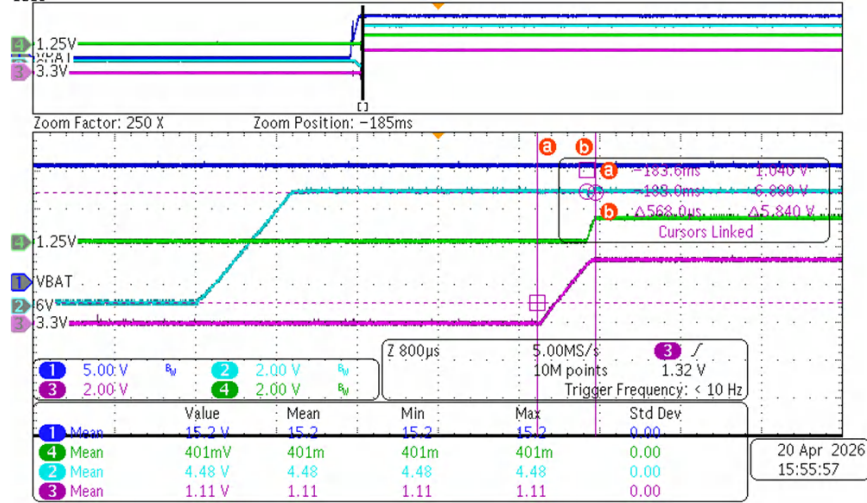


图 3-2. PMIC 的上电时序

3.2.2 F29P32 复位序列

图 3-3 展示 F29P32 在 3.3V 供电后复位时间为 7.4mS。

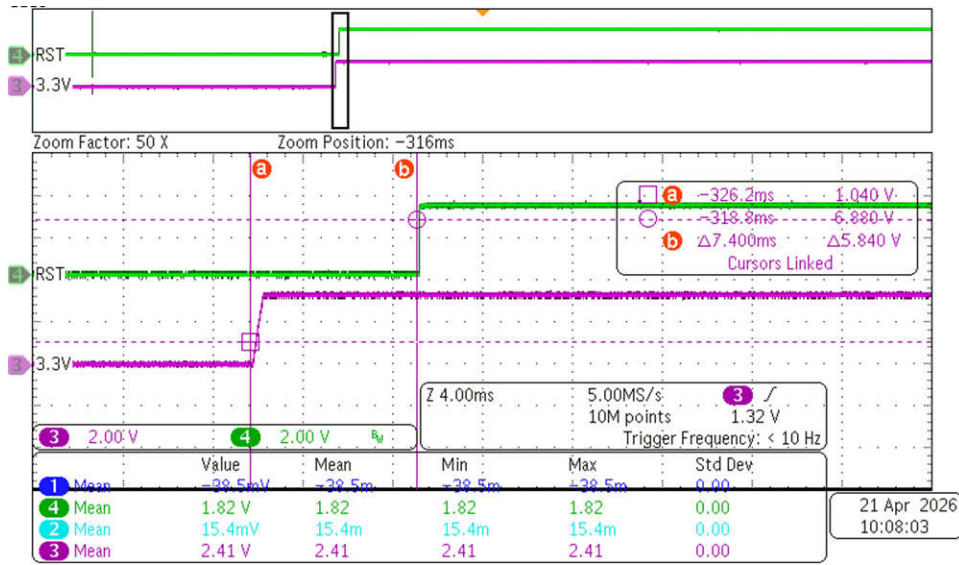


图 3-3. F29P32 复位序列

3.2.3 25MHz 时钟

图 3-4 展示 CDC6C025000 生成的 25MHz 时钟。

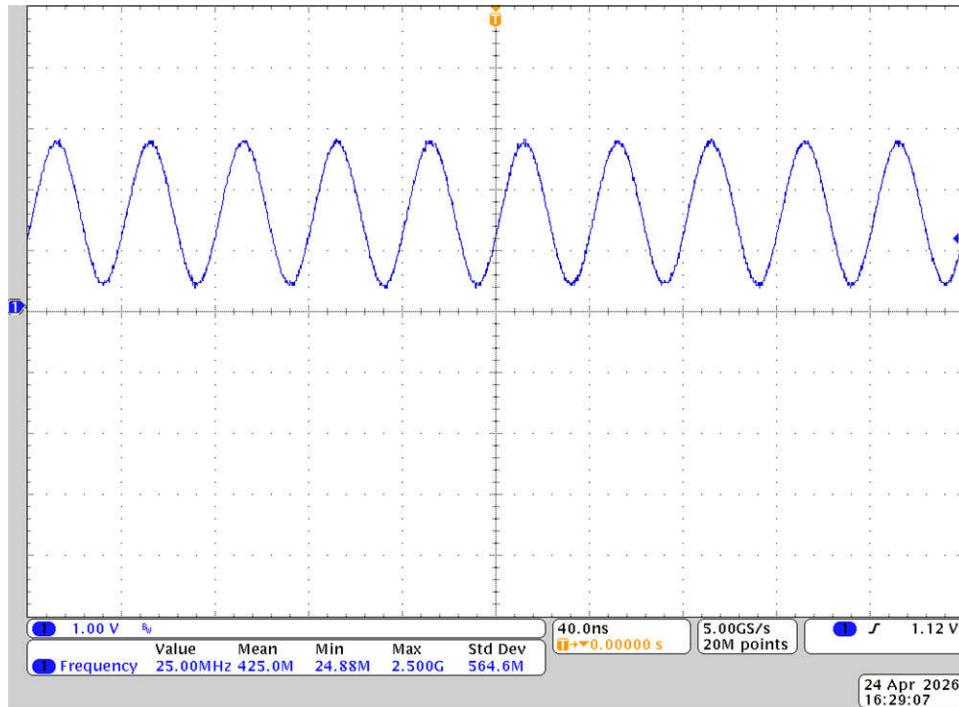


图 3-4. 25MHz 时钟

3.2.4 使用外部 1.25V 的时序

VREGENZ 是 F29 确定使用内部还是外部 1.25V 电源的信号，图 3-5 展示 VREGENZ 的时序，此信号随 3.3V 一起上升，因此选择外部 1.25V 电源。

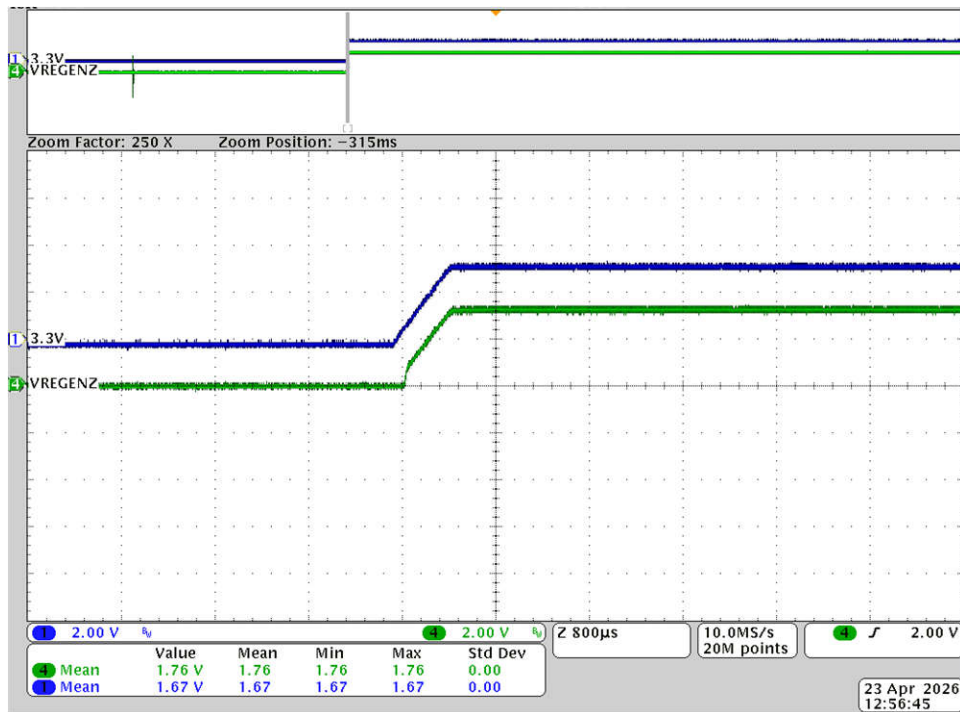


图 3-5. VREGENZ 上电时序

3.3 F29P32 固件入门

请联系当地的 TI 销售代表获取 F29P32 固件。

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-020106](#) 中的设计文件。

4.1.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-020106](#) 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议

该参考设计使用具有两层 2oz 铜的 PCB 来实现，并采用底部 SMD 元件放置方式，以节省成本和电路板面积。在设计 PCB 时，需要注意几个重要方面。以下列出了每个块的系统级放置方式和布局。

- 将各个元件 (或单个元件) 分为高压与低压、高电流与低电流，以及高阻抗与低阻抗组。将低压和高阻抗元件及信号放置在一起并进行布线，例如与微控制器相关的信号和 IPM 的输入侧。使用整个覆铜区来为这些区域提供集成的 GND 平面。交流输入、滤波器和整流器以及 IPM 输出侧是高压、高电流和低阻抗器件及信号，使用更宽的布线或覆铜来提供高电流路径，并还要将它们与上面的低压、高阻抗信号分开，以减少干扰。
- 大功率路径中的元件处于 PCB 的外边缘，并尽可能互相靠近。微控制器放置在中心，以便与所有需要控制的电源块保持最佳距离。引脚进行了合理分配，以尽可能减小控制信号或反馈信号引线距离并尽可能减少模拟信号和数字信号之间的交叉。
- 交流线路保护和 EMI 滤波器
 - 所有交流线路保护元件紧密地放置在一起，尽可能缩短连接路径。在保护和 EMI 滤波器电路周围提供了接地连接保护。
- 电机驱动器
 - 为了满足高纹波要求，电机驱动器应尽可能靠近薄膜电容器和直流总线电容器组放置。
 - 实施了采用四线检测的低侧分流电阻器方法来进行电流检测。使用具有阻抗匹配电阻器的差分对将来自分流电阻器的检测信号连接到运算放大器电路。分流电阻放置在模块附近，并直接连接接地铜平面。
- 辅助电源
 - 辅助电源的 GND 直接独立地连接直流总线电容器组，以将低电流与逆变器的高电流和高频 GND 布线分开。

4.1.4 Altium 工程

要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-020106](#) 中的设计文件。

4.1.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-020106](#) 的设计文件。

4.2 软件文件

CCSTUDIO	Code Composer Studio 集成开发环境
F29-SDK	F29 DSP SDK

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [具有 C29x 200MHz 微控制器的 C2000 64 位 MCU 数据表](#)
2. 德州仪器 (TI), [F29 实时微控制器 技术参考手册](#)

4.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、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，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](#)。

4.5 商标

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

Arm™ is a trademark of Arm Holdings.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

HELY ZHANG 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责家用电器和汽车底盘参考设计的开发，特别是与电力电子和电机逆变器相关的设计。Hely 于 2002 年获得了安徽理工大学电力电子与电力传动专业硕士学位。在加入 TI 之前，他曾就职于通用电气和 SolarEdge。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月