

Design Guide: TIDA-020101

汽车级 48V 300W HVAC 泵、风机和风扇参考设计



说明

该参考设计展示了 48V、300W 峰值智能电机无刷直流 (BLDC) 实现方案。该分立式方法可实现紧凑且灵活的结构设计，最小直径仅为 55mm。该设计可保持低于 100 μ A 的低功耗睡眠模式。该设计利用 TI 半导体实现高效运行。该架构可满足车载暖通空调 (HVAC) 大功率、高精度、小型化的严苛使用需求，为此类应用奠定了可靠的技术基础。

资源

TIDA-020101	设计文件夹
DRV8363-Q1	产品文件夹
TLIN4029A-Q1	产品文件夹
MSPM0G3507-Q1	产品文件夹
LM5168-Q1	产品文件夹
TPS7B81-Q1	产品文件夹
MSPM0 无传感器 FOC 调优	用户指南

特性

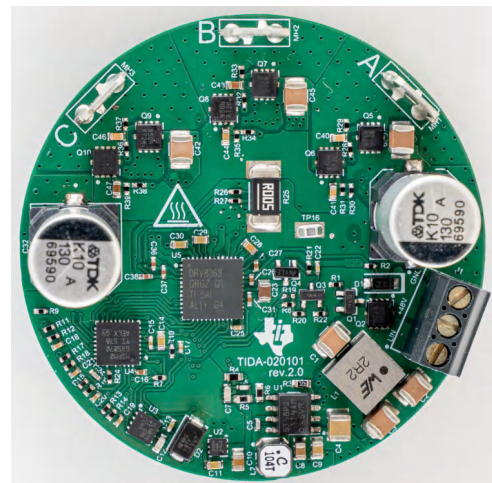
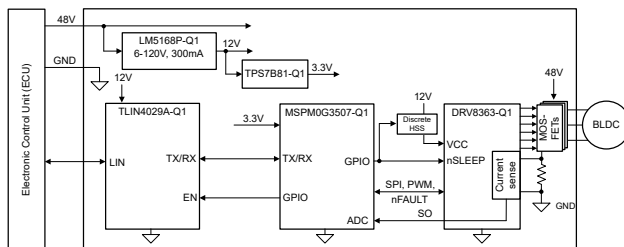
- 外形小巧 (直径为 55mm 的 PCB, 单面元件放置)
- 低睡眠电流 (最大值 <100 μ A)
- 70V LIN 总线故障电压, 可在 48V 架构中实现稳健的 LIN 通信
- 即用型磁场定向控制 (FOC) 算法及免版权的微控制器抽象层 (MCAL) 驱动器 (支持本地互连网络 [LIN] 2.x 及约 50Hz 至 10kHz 脉宽调制 [PWM])
- 通过 LIN 实现睡眠与唤醒
- 灵活的通信接口支持 LIN2.x 和 PWM (约 50Hz 至 10kHz PWM)

应用

- 汽车热管理风机、风扇和泵模块
- 发动机风扇
- 汽车泵



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

与有刷直流 (BDC) 电机相比, 无刷直流 (BLDC) 电机凭借更优异的性能特点, 在汽车应用领域正日益受到青睐。BLDC 电机具有效率更高、使用寿命更长以及电气噪声更低等优势。

同时, 向 48V 架构的转型势头持续增强。在智能执行器领域, 预计功率约为 100W 的负载将率先从 12V 过渡到 48V, 因为这些负载在减重方面具有最大的潜力。

该参考设计介绍了一种全面的方法, 用于在各种汽车设备 (包括 HVAC 风机、电动流体泵、冷却风扇及其他相关设备) 中实现 48V BLDC 智能电机。此设计支持直径为 55mm 的紧凑圆形外形, 顺应了不断演变的市场趋势。此外, 此参考设计利用 TI 的低睡眠电流 (最大值 $100 \mu\text{A}$) 来提高功效。

该参考设计的一个主要特性是使用 TI 的单分流器无传感器 FOC 算法进行换向控制。该算法可完全定制并集成到用户特定的应用中。此算法集成了免版税的 MCAL 驱动程序, 支持 LIN2.x 和高达 10kHz 的 PWM 频率, 为无缝系统集成提供了灵活的通信选项。

为了确保系统安全运行, 该参考设计内置了安全启动和固件更新功能, 使用户能够精确控制系统软件配置。此外, 在 48V 架构中实现业界出色的稳健 LIN 通信, 彰显了 TI 对可靠性和性能的承诺, 其中一个显著亮点是市场上首款 70V LIN 总线故障电压发射器。

为了满足可扩展性要求, 该参考设计在各种接口上 (包括 LIN TX 和 LIN RX、电机电源以及其他相关连接) 实现了引脚对引脚兼容性。该系统还支持通过 LIN 实现睡眠和唤醒功能, 允许器件在闲置期间进入低功耗状态, 同时保持快速响应能力。

这些模拟元件具备反极性保护功能且配备了 PI 滤波器, 封装在直径为 55mm 的紧凑型圆形 PCB 中。该外形尺寸与典型的电机驱动板高度相似, 便于集成到现有系统中。该 PCB 使用 3 引脚螺钉连接器, 可获取 +48V、GND 和 LIN 信号。

1.1 主要系统规格

参数		注释	最小值	典型值	最大值	单位
V_{IN}	输入电压	建议的运行条件	13	48	85	V
I_{IN}	输入电流	输入电流功能 EMI 滤波器	-	-	12.4	A
$I_{OUT,rms}$	输出电流		-	6.25	-	A
I_{SLEEP}	睡眠电流	系统处于睡眠模式时输入连接器处的电流	-	80.7	-	μA
V_{LIN_FAULT}	LIN 总线故障电压		-	-	± 70	V
f_{PWM}	PWM 频率		-	20	-	kHz
f_{FOC}	FOC 速率	FOC 控制环路速率		5	16	kHz
T_A	环境温度		-40	25	125	$^{\circ}\text{C}$
d	桶形插头	圆形 PCB 的直径	-	55	-	mm



警告

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 $^{\circ}\text{C}$ 以上的高温。在运行过程中或运行刚结束时, 不得触摸电路板, 因为可能存在高温。

2 系统概述

图 2-1 和 图 2-2 展示了系统架构照片，其中突出显示了 FR4 四层 PCB 的关键元件。该 PCB 包含一个 LIN 通信接口、一个微控制器 (MCU)、一个用于 BLDC 电机的栅极驱动器和一个电源。这些 IC 还由以下器件提供额外支持，例如：三个半桥 MOSFET、一个用于有源反极性保护的 MOSFET、一个 EMI 滤波电感器和一个分流电阻器。

设计该电路板时应仔细考虑元件放置问题。所有有源元件均经过战略性布局，既能将热量均匀分散至 PCB 表面，又能保持连接器进出电流的高效路径。此外，该设计中的所有基本元件都放置在 PCB 的顶部，从而最大限度地利用空间，符合泵、风机和风扇行业最新的空间布局要求。PCB 的底层专用于测试目的，在终端产品中可完全移除。

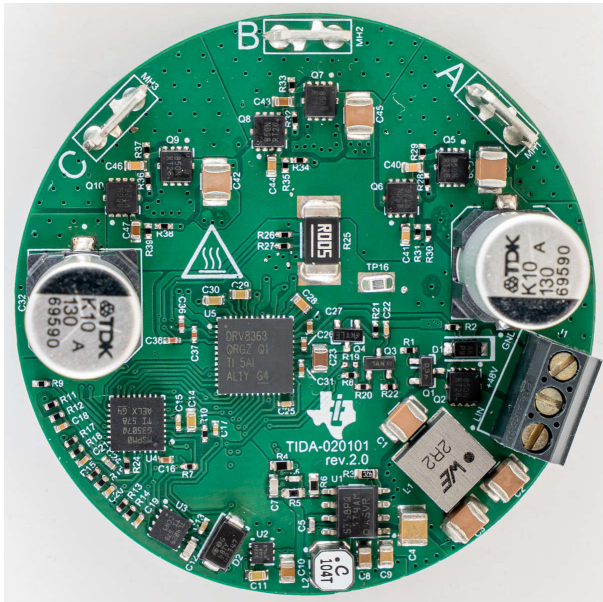


图 2-1. TIDA-020101 PCB (顶视图)

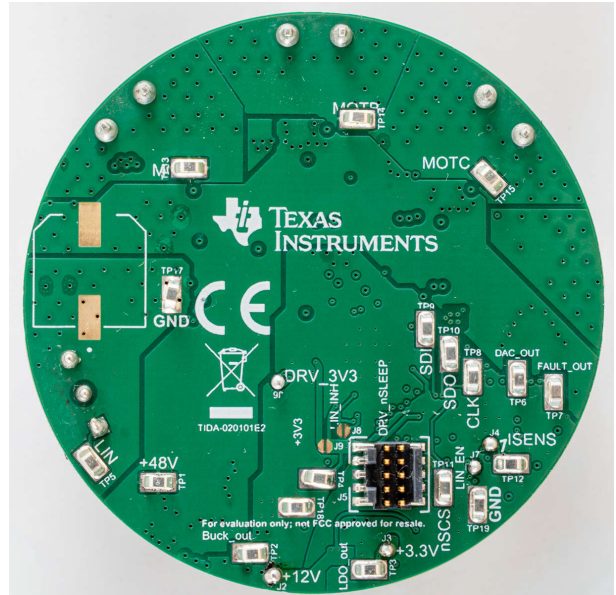


图 2-2. TIDA-020101 PCB 底视图

2.1 方框图

图 2-3 显示了 TIDA-020101 的框图。

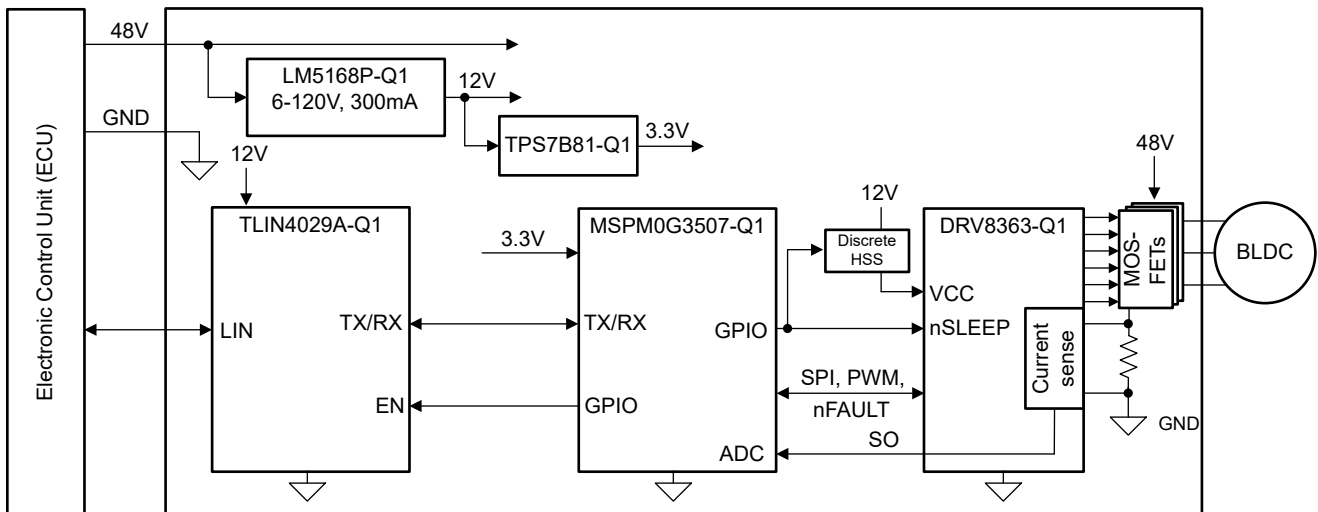


图 2-3. TIDA-020101 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 48V 智能执行器架构

随着电气化程度的提高，现代汽车系统正朝着更高电压的架构发展。实现 48V 智能执行器系统主要有三种架构，每种架构都具有独特的特点和权衡取舍。

2.2.1.1 48V 配电架构

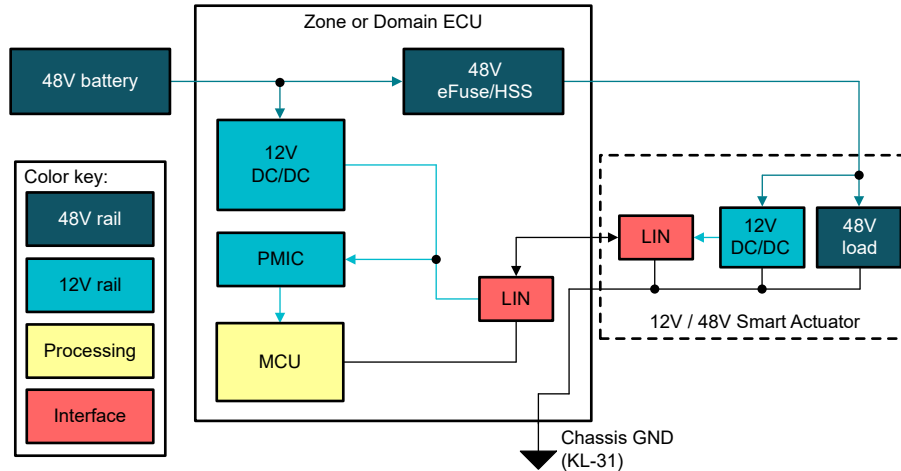


图 2-4. 48V 架构

如 图 2-4 所示，48V 架构采用简化的布线方法，仅需两到三根导线 (48V、LIN、GND) 即可将区域或域电子控制单元 (ECU) 连接到智能执行器。智能执行器包含功率级，可为通信接口、MCU 和电机驱动器生成所需的电压。这种方法在确保为执行器提供充足供电的同时，将布线复杂度降至最低。

主要特性包括：

- 布线方案简单
- 每个智能执行器内所需的直流 - 直流转换器
- 潜在的系统故障包括 48V 和 LIN 之间的短路和接地失效

2.2.1.2 48V 和 12V 配电架构

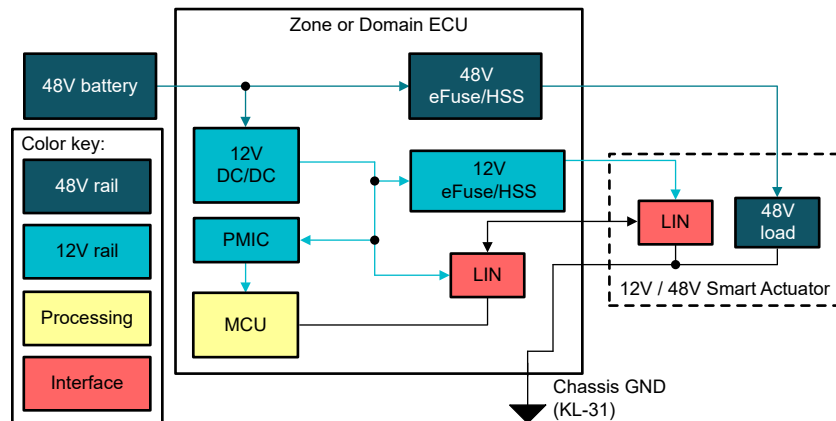


图 2-5. 48V 和 12V 配电架构

若采用这种折中方法，则需要三到四根导线 (48V、12V、LIN、GND) 将 48V 和 12V 电源分配给智能执行器，如 图 2-5 所示。上部 ECU 包含 48V 和 12V 高侧开关，这增加了配电系统的复杂性。

主要特性包括：

- 布线复杂性为中等

- 可能出现 48V LIN 总线故障
- 系统故障包括 48V 和 LIN 之间的短路以及 48V 和 12V 之间的短路

2.2.1.3 48V 和 12V 供电架构

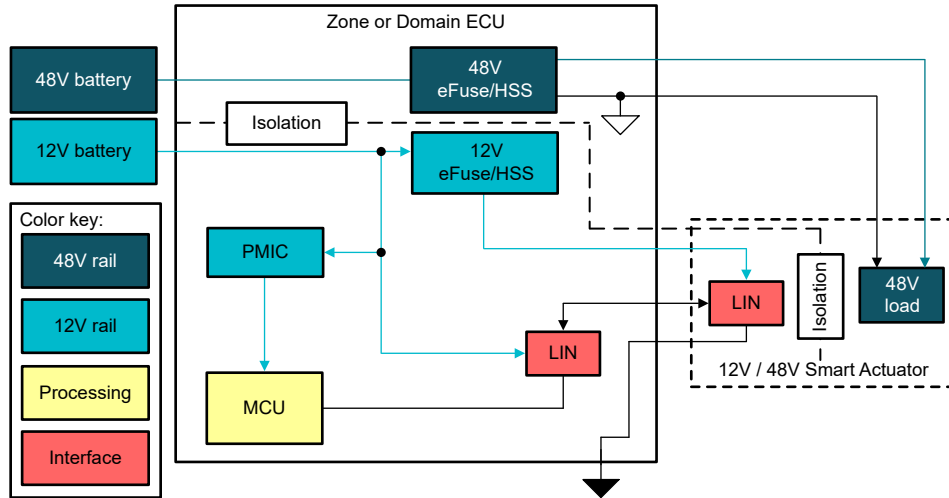


图 2-6. 48V 和 12V 供电架构

图 2-6 展示了最复杂的架构，并使用五根导线 (48V、12V、LIN、GND_12V、GND_48V) 在电源域之间进行隔离。这种方法为混合电压架构提供了最高级别的保护和容错能力。

主要特性包括：

- 最复杂的布线方案
- 隔离元件可以保护 48V 至 LIN 或 12V 线路
- 隔离功能消除了接地失效隐患
- 需要额外的隔离元件，从而增加了系统成本

2.2.1.4 参考设计架构

此参考设计选择了 48V 配电架构，因为该方法契合当前市场发展趋势，同时具备最优成本效益。这种架构在满足性能要求的同时，实现了系统复杂度、元器件数量与可靠性之间的平衡。简化的布线方案可降低车辆重量和制造成本，而每个智能执行器中的集成式直流 - 直流转换器可在本地完成必要的电压转换，从而提高整体系统效率并减少电磁干扰。

2.2.2 低功耗睡眠模式架构

许多应用程序并非持续运行，而是周期性或不定期地运行。因此，有时会采用低功耗模式来节省电能，从而延长 EV 的续航里程。实现此类模式的两种方法如下：

- 上部 ECU 中实现的高侧开关或电子保险丝能在低功耗模式下完全切断边缘电源
- 采用支持 LIN 唤醒功能的持续供电边缘节点，可启用睡眠模式并通过 LIN 进行远程唤醒

由于最新的市场趋势，此参考设计使用 LIN 远程唤醒方法。该方法不依赖上部 ECU，稳定地让睡眠电流低于 100 μ A。

图 2-7 以图形方式显示系统功能模式。

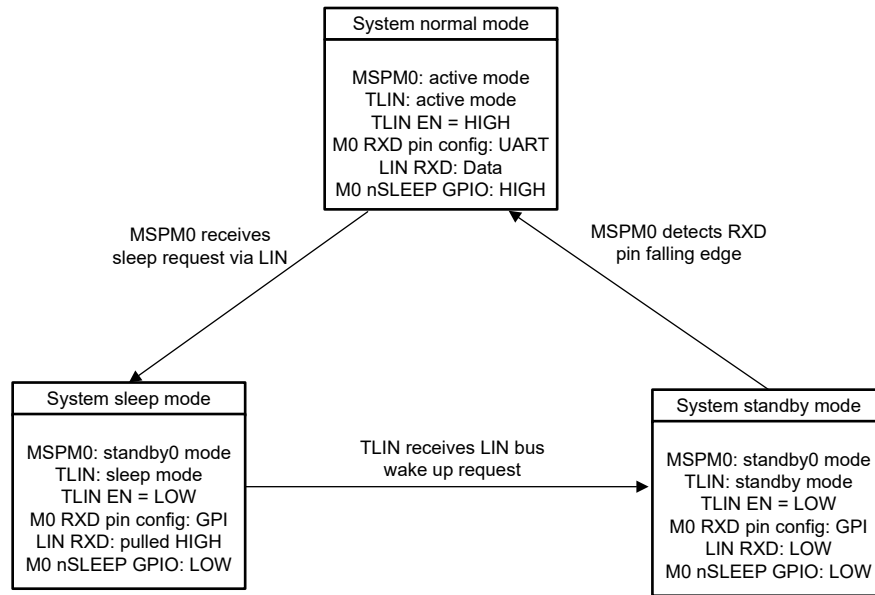


图 2-7. 系统功能模式

2.2.3 大容量电容估算

用于驱动 BLDC 电机的高频 PWM 信号会在直流链路电容器中产生电压波动和交流电流。特别是对于在接近单位功率因数下运行的 PMSM，这些电容器上的最大估算电流应力可以通过方程式 1 计算。

$$I_{C,rms} \cong \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_{OUT,rms} \quad (1)$$

方程式 2 表示电流的瞬时值。

$$I_{C,rms} = C_{bulk} \times \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

在 $I_{OUT,rms} = 6.25A$ 时，若允许的最大电容器纹波电压为 $V_{ripple} = 1V$ ，则可通过方程式 3 估算所需的最小电容值。

$$C_{bulk} = I_{C,rms} \times \frac{dt}{dV} = I_{C,rms} \times \frac{1}{f_{PWM} \times dV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times I_{OUT,rms} \times \frac{1}{f_{PWM} \times dV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 6.25A \times \frac{1}{20kHz \times 1V} = 221\mu F \quad (3)$$

该估算值可作为实验室验证的有用基线，能确定是否可以实现 $V_{ripple} = 1V$ 的纹波电压或者是否需要额外的电容。根据此计算，已提供 $C_{bulk} = 290\mu F$ 的大容量电容，并预留了额外的安装空间，以便在需要时可容纳额外的 $130\mu F$ 电容。

2.2.4 EMI PI 滤波器

板载 EMI 输入滤波器旨在抑制 PWM 工作产生的低频噪声。此滤波电路包括电容器 C1、C2 和 C3 以及功率电感器 L1。图 2-8 展示了此滤波器的频率响应，结果表明在 150kHz 以上的频率范围内，衰减超过 30dB。

2.2.6 48V 架构的 LIN 总线故障电压

面向 48V 系统的现代汽车电气标准确立了 12V、24V 和 48V 电源电压范围内的电气和电子元件的全面要求。相较于直流 - 直流转换器供电的架构，由交流发电机或发电机供电的系统在高级规格中要求设置更高的保护阈值，这一设计适配现代车载电源系统严苛的运行工况。

前沿的 48V 汽车系统需要 LIN 总线架构。该架构能够在 70V 的最大额定规格下承受 V_{BAT} 的短路条件，多根线缆共用同一线束布线时该要求尤为关键。这种 70V 故障耐压指标是目前车用通信网络领域最优的设计规范。

此外，边缘节点处发生接地失效时，LIN 总线电位会飘升至电池电压，同样可达 70V 电压上限。这种较高的故障电压能力可在极具挑战性的汽车电气故障条件下实现可靠运行，并将 70V 耐压因此成为高端 48V 系统设计的基准指标。

2.3 重点产品

该参考设计忠实再现了实际终端产品的外形、尺寸和功能，每个元件均经过精心挑选，旨在提供一款紧凑、静态电流 (IQ) 低的智能电机解决方案。该设计的核心是集成式智能栅极驱动器 DRV8363-Q1。它不仅能驱动 48V 电机，还提供先进的诊断功能和强大的保护功能。电机控制由 MSPM0G-Q1 MCU 系列无缝处理。该系列运行无传感器磁场定向控制 (FOC) 算法并充分利用 DRV8363-Q1 内置的电流检测放大器。TLIN4029A-Q1 是 TI 的 $\pm 70V$ 总线故障电压 LIN 收发器，可在 48V 架构内提供可靠且具有成本效益的通信接口。除了这些关键组件的低功耗功能外，基于 LM5168P-Q1 和 TPS7B81-Q1 构建的低 IQ 电源树可实现满足最新市场需求的整体系统设计。

2.3.1 TLIN4029A-Q1

此参考设计利用 $\pm 70V$ 总线故障电压 LIN 收发器，可为 48V 智能电机提供充足的余量。

如果可接受较低的 $\pm 60V$ 总线故障电压，则可以改用与引脚兼容的 TLIN2021A-Q1。该器件集成了额外的唤醒和 INH 功能，因此无需外部 LDO 来生成 3.3V 电压。与使用外部 3.3V LDO 相比，利用 DRV8363-Q1 内置的 LDO 可降低成本。

2.3.2 MSPM0G3507-Q1

80MHz MSPM0G3507-Q1 MCU 支持使用集成式数学加速器，在保持 20kHz PWM 输出频率的同时，实现高达 10kHz 的无传感器 FOC 控制环路速率。如果较低的 FOC 控制环路速率已足够满足需求，则可选用 MSPM0G3106-Q1 以优化成本。有关如何为智能执行器选择合适的 MSPM0 MCU 的更多详细信息，请参阅[汽车智能执行器](#)。

2.3.3 DRV8363-Q1

DRV8363-Q1 是一款集成式智能栅极驱动器，专为 48V 汽车三相 BLDC 应用而构建，因此该器件成为此 300W HVAC 泵、风机和风扇设计的实用选择。该器件集成三路半桥栅极驱动器。每个驱动器均可驱动高侧和低侧的 N 通道功率 MOSFET，并使用外部 12V 电源生成合适的栅极驱动电压，且为高侧 MOSFET 配置集成式自举二极管。DRV8363-Q1 在该应用中的一个主要优势是集成了三通道低侧电流检测放大器 (CSA) 并在所有六个开关上进行 VDS 监测，无需任何额外的外部电路即可实现精确的 FOC 电流检测和强大的过流保护。若采用分立元件实现上述任一功能，都会显著增加 BOM 成本、电路板面积和设计复杂性，并且与该设计的 55mm 紧凑外形尺寸不兼容。此外，该器件还配备了一套全面的先进诊断功能和可配置的故障保护功能，从而能够构建一个仅需极少外部支持元件的强健电机驱动系统。智能栅极驱动架构支持可配置的峰值栅极驱动电流，范围为 16mA 到最高 1A 的拉电流和 2A 的灌电流，这与 300W 峰值功率水平非常匹配，并在 8V 至 85V 的宽输入范围内运行，可轻松覆盖包括瞬态在内的整个 48V 电池工作窗口。集成式涓流电荷泵支持 100% PWM 占空比控制。集成的电荷泵输出 (VCP) 还能用于实现有源反向极性保护，并且在睡眠模式下可使用 P 通道 MOSFET 完全切断 12V 电源，从而使系统睡眠电流低于 100 μ A。这款可灵活配置的串行外设接口 (SPI) 能够与 MSPM0G3507-Q1 MCU 无缝集成，使 DRV8363-Q1 这种实用栅极驱动器设计适用于具有成本效益且稳健的紧凑型 48V 智能电机参考设计。

2.3.4 LM5168P-Q1

LM5168P-Q1 同步降压转换器可在宽输入电压范围内进行稳压，从而更大幅度地减少对外部浪涌抑制元件的需求。50ns 的最短可控导通时间有助于实现较大的降压比，支持从 48V 标称输入到低电压轨的直接降压转换，从而降低系统复杂度并节省成本。LM5168P-Q1 具有集成式高侧和低侧功率 MOSFET，可提供高达 0.3A 的输出电流。恒定导通时间 (COT) 控制架构可提供几乎恒定的开关频率，具有出色的负载和线路瞬态响应。LM5168P-Q1 采用自动模式，可实现超低 I_Q 和二极管仿真模式运行，从而实现高轻负载效率。这对满足系统睡眠模式下电流小于 100 μ A 的系统要求至关重要。

2.3.5 TPS7B81-Q1

在汽车电池连接应用中，低静态电流 (I_Q) 对于省电和延长电池寿命至关重要。常开型系统必须在扩展温度范围内具有超低 I_Q ，以确保系统处于睡眠模式时仍能持续运行。TPS7B81-Q1 是一款低压降 (LDO) 线性稳压器，在轻负载条件下仅提供 2.7 μ A 的典型静态电流。因此，该器件采用高效架构设计，适用于为待机系统内的微控制器与收发器供电。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

此参考设计展示了概念验证功能以及 TI 产品组合元件在高度受限的外形尺寸内所具备的卓越微型化能力。当前的实现方案侧重于空间优化和功能验证。该项设计展示了 TI 先进的半导体技术如何集成到紧凑的 PCB 几何形状中，同时保持基本的性能特性。未来的设计迭代将纳入全面的电磁干扰 (EMI) 优化策略中，并加强爬电距离和间距的考量，以满足严格的汽车合规标准。这种方法使工程师能够首先验证核心功能和可行性，然后再推进到完全符合法规要求的量产级实现方案。

3.1.1 参考设计硬件和编程设置

参考设计底面设有编程接口 (J5)。该接口用作连接 XDS110 编程器的接口点。图 3-1 图示为推荐的设置。

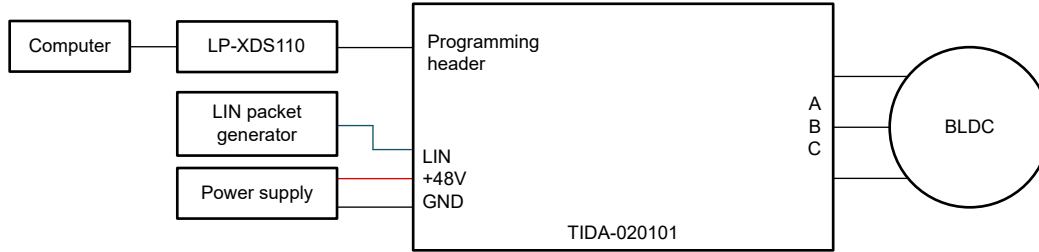


图 3-1. 硬件设置

使用以下链接，获取设置所需的工具：

- [XDS110 LaunchPad™ 开发套件调试器](#)
- [Samtec 编程电缆：FFSD-05-D-06.00-01-N](#)

3.2 软件

本参考设计的综合软件包可从参考设计文件夹中下载。该软件包为工程师提供了经过验证的实现框架，可立即投入使用。该软件是在 M0 SDK 中所开发的无传感器场定向控制 (FOC) 算法的改编版本。该算法针对此硬件进行了专门的重新配置。

为了促进无缝集成和增强性能，工程师可以使用 [MSPM0 无传感器 FOC 调优](#) 用户指南。该指南针对算法调整和参数调优提供了详细指导。易于获取的软件与全面的调优文档相结合，可有效缩短产品开发周期。这种组合确保了电机在各种运行条件下都能保持稳定的控制性能。

软件规范列于表 3-1 中。

表 3-1. TIDA-020101 无传感器 FOC 软件规范

参数	值
文件名	sensorless-foc_TIDA020101_nortos_ticlang
所使用的闪存大小	40kb, 128kb (32%)
所使用的 SRAM 大小	1.2kb, 32kb (4%)

3.3 测试设置

此设计使用 Teknic® M-2310P-LN-04K 三相 BLDC 电机进行了测试。表 3-2 显示了此电机的简要规格。

表 3-2. Teknic® M-2310P-LN-04K 三相 BLDC 电机规范

参数	值	单位
电机器件编号	M-2310P-LN-04K	-
相间电阻	720	mΩ
相间电感	400	μH
反 EMF 常数	4.64	V _{peak} /kRPM
反 EMF 常数	348	mV/Hz × 10
极对数	4	-
最大电机转速	400	Hz

为了给电机提供负载，将第二台同型号的电机通过轴联轴器和铝制框架支架连接到被测设备 (DUT) 上。负载电机的相位通过可调负载电阻器短接，以加载 DUT 电机。

小心

关于此测试设置，有几点需要注意：

1. 电机高速旋转，且扭矩足够大，可能造成损坏或人身伤害。测试期间，请务必确保衣物、工具及其他物品远离旋转轴。
2. 超过 50V 的供电电压存在触电风险。将 48V 供电电压设置为高于额定值时需格外谨慎。
3. 两台电机之间的牢固连接对于安全运行和准确测量电机性能至关重要。错位可能导致联轴器损坏或测试结果不准确。
4. 电机转速的快速变化会导致电机产生过压。请注意，产生的电压可能会超过 48V 电源的电压设定点。

表 3-3 总结了使用此参考设计所执行的测试。

表 3-3. 已执行的测试列表

测试名称	通过标准
LIN 远程唤醒时序分析	$t_{\text{wakeup}} \leq 10\text{ms}$ (4)
系统睡眠电流分析	$I_{\text{sleep}} \leq 100\mu\text{A}$ (5)
直流链路电压纹波	$V_{\text{ripple}} \leq 1\text{V}$ (6)
热像图	-

3.4 测试结果

表 3-4 总结了使用此参考设计所执行的测试。

表 3-4. 测试结果列表

测试名称	测试结果
LIN 远程唤醒时序分析	$t_{\text{wakeup}} = 148\mu\text{s}$ (7)
系统睡眠电流分析	$I_{\text{sleep}} = 81\mu\text{A}$ (8)
直流链路电压纹波	$V_{\text{ripple}} = 26.5\text{mV}$ (9)

表 3-4. 测试结果列表 (续)

测试名称	测试结果
热像图	可用

3.4.1 LIN 远程唤醒时序分析

LIN 远程唤醒时序分析可在 LIN 网络节点从睡眠模式转换为运行模式时评估时序特性和响应参数。在通过 LIN 总线接收到唤醒信号时发生转换。此项分析证实：唤醒序列满足指定的时序要求，从而可靠的激活系统。该项分析包括信号传播延迟和节点响应时间。

3.4.1.1 测试设置

在以下示波器图中，LIN 收发器 (U3) 的输入由连接到 TLIN2029EVM 的外部电源驱动。根据[低功耗睡眠模式](#)部分，软件将系统置于系统睡眠模式 (MSPM0 处于 STANDBY0 状态)。只要 MCU 处于睡眠模式，软件就会在 PA16 (TP7) 上输出低电平信号。当 MCU 处于有源模式时，PA16 (TP7) 被驱动为高电平。

测试条件：

- 所使用的软件：TIDA-020101_sleep_mode_current_test
- 电源：向 J1 提供 +48V 和 GND
- 环境空气温度：25°C

唤醒过程：

- 为了使用 LIN 唤醒 TIDA-020101，外部连接的 TLIN2029EVM 会输出唤醒信号。这是一个持续时间为 250µs 的显性脉冲。

通过标准：

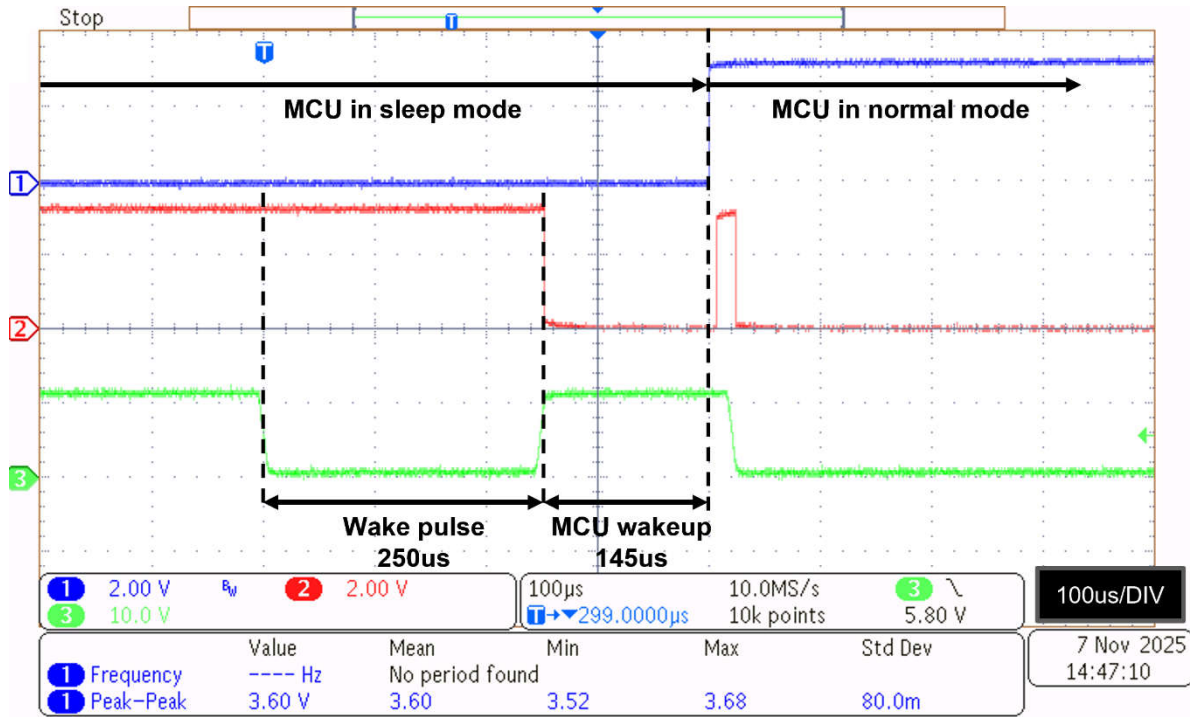
- TIDA-020101 的 MCU 必须在 LIN 总线上升沿之后 10ms 内再次处于正常模式。

示波器绘制信号：

- CH1：MCU_normal_mode (TP7)
- CH2：LIN_RXD (R7)
- CH3：LIN (TP5)

3.4.1.2 测试结果

图 3-2 展示了 LIN 远程唤醒时序分析的示波器图。



CH1 : MCU_normal_mode (TP7) 蓝色

CH2 : LIN_RXD (R7) 红色

CH3 : LIN (TP5) 浅绿色

$t_{wakeup} = 148 \mu s \rightarrow$ 测试通过

图 3-2. LIN 远程唤醒时序分析示波器图

3.4.2 系统睡眠电流分析

集成了一种低功耗模式，详见节 2.2.2，以便在系统处于空闲状态时降低功耗。该项分析可评估设计的低功耗功能。

3.4.2.1 测试设置

通过 J1 向 TIDA-020101 DUT PCB 提供 48V 和 GND。使用一个 8½ 数字万用表监测电源电流。测试软件刷写到 MCU 上。该 MCU 将 PA3 驱动为低电平，以使用分立式高侧开关禁用 DRV8363，并进一步将 TLIN4029A-Q1 置于睡眠模式。PA17 上的 MSPM0 内部上拉被禁用。MSPM0 被置于 STANDBY0 模式。在该状态下测量睡眠电流。

测试条件：

- 所使用的软件：TIDA-020101_sleep_mode_current_test
- 电源：向 J1 提供 +48V 和 GND
- 环境空气温度：25°C

通过标准：

- 在以下条件下，测试通过： $I_{sleep} < 100 \mu A$

3.4.2.2 测试结果

睡眠电流读数取自 8½ 位万用表。

- $I_{sleep} = 81 \mu A \rightarrow$ 测试通过

3.4.3 直流链路电压纹波

在节 2.2.3 中估算的 PCB 直流链路电容，在此次分析中进行了评估。

3.4.3.1 测试设置

通过 J1 向 TIDA-020101 DUT PCB 提供 48V 和 GND。在未连接负载电机的情况下使用节 3.3 中指定的测试设置和节 3.2 中指定的软件，电机以 400Hz 电气频率旋转。为了测量直流链路电压纹波，使用示波器探测 C35 上的电压。

测试条件：

- 所使用的软件：TIDA-020101_sleep_mode_current_test
- 电源：向 J1 提供 +48V 和 GND
- 环境空气温度：25°C
- 无机械负载

通过标准：

- 在以下条件下，测试通过：

$$V_{\text{ripple}} \leq 1V$$

(10)

示波器绘制信号：

- CH1：直流总线电压 (C35)
- CH2：A 相 (TP13)

3.4.3.2 测试结果

图 3-3 展示了直流链路电压纹波测试的示波器图。

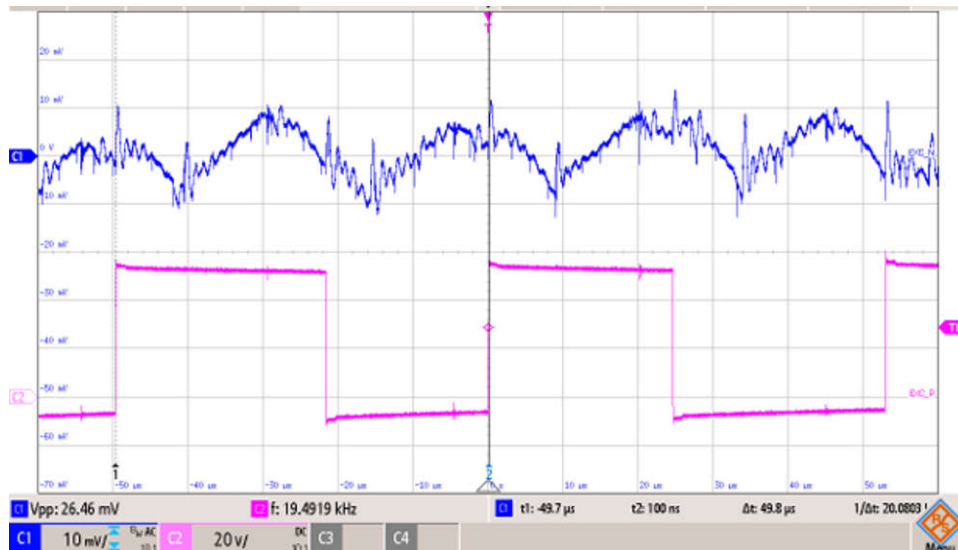


图 3-3. 直流链路电压纹波

$$V_{\text{ripple}} = 26.5\text{mV} \rightarrow \text{Test PASSED}$$

(11)

3.4.4 热像图

在图 3-4 中，可以看到各个元件的表面温度。环境温度为室温。使用以下层堆栈。有关层堆栈的更多详细信息，请参阅设计文件。

- 顶层铜层：2oz
- 内部第 1 层铜：1oz
- 内部第 2 层覆铜：1oz
- 底层：2oz

所有热感图像均在以下测试条件下拍摄：

- 所使用的软件：sensorless-foc_TIDA020101_nortos_ticlang
- V_{bus} : 48V
- 电气输入功率：300W RMS
- 环境空气温度：25°C
- 机械速度：6000RPM
- 热像仪：TESTO 883

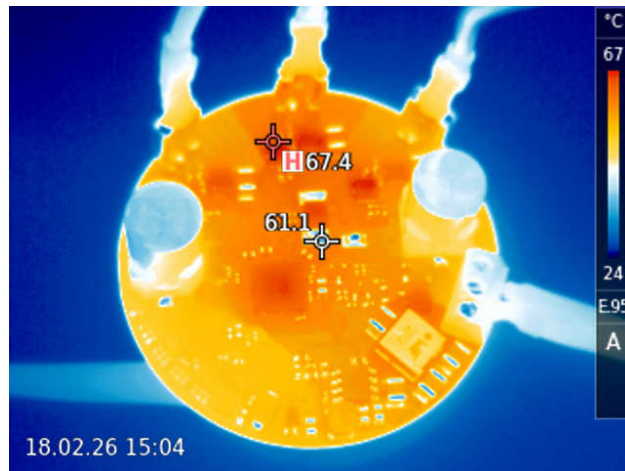


图 3-4. TIDA-020101 热感图像

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

要访问所有可用的设计文件，请参阅 [TIDA-020101](#)。

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-020101](#) 中的设计文件。

图 4-1 图示为 TIDA-020101 48V BLDC 泵、风机、发动机和风扇原理图。

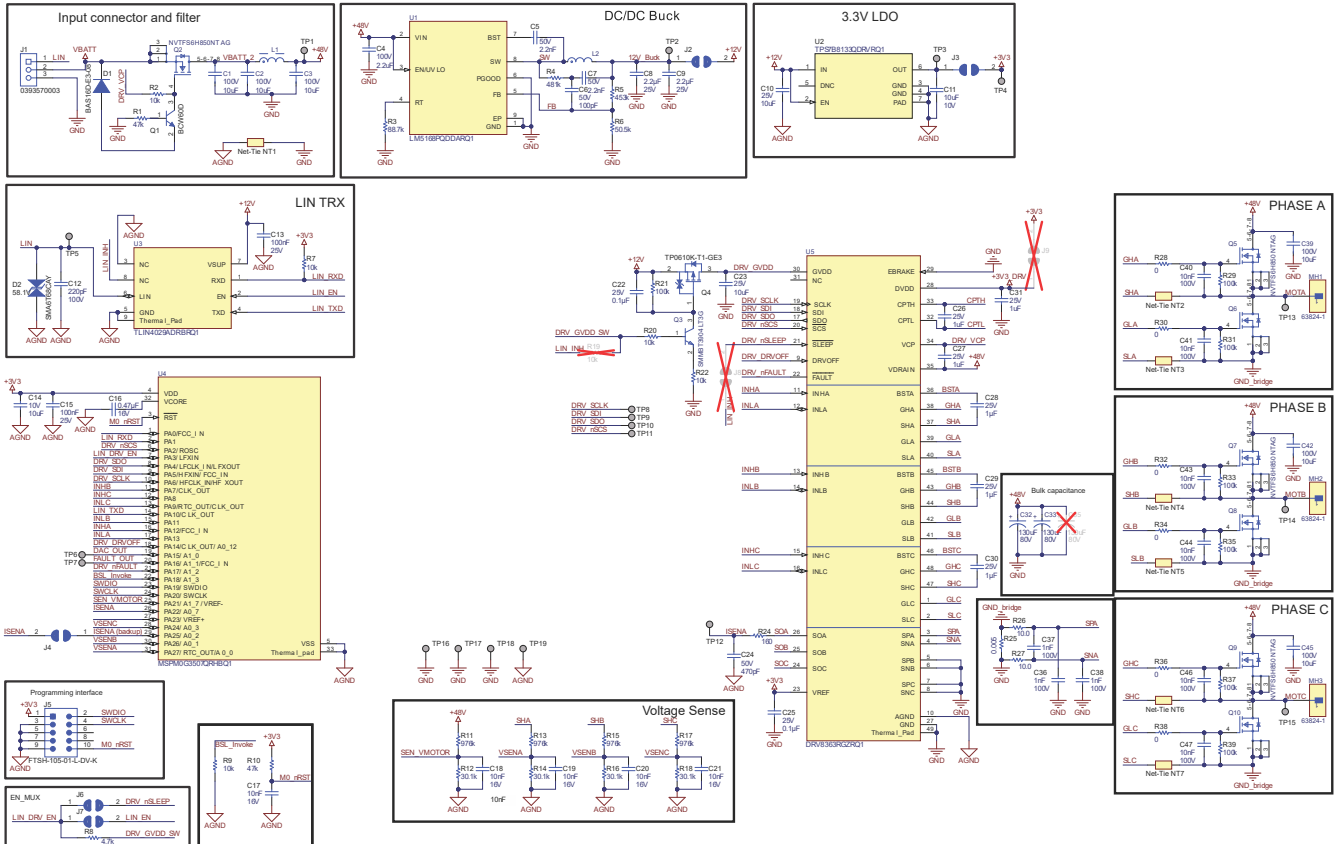


图 4-1. TIDA-020101 原理图

4.1.2 BOM

若要下载 BOM，请参阅 [TIDA-020101](#) 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议

请遵循 [TI 分流电阻器布局注意事项](#)。

4.1.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-020101](#) 中的设计文件。

4.1.3.2 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-020101](#) 的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

CCSTUDIO-THEIA	Code Composer Studio™ Theia v1.x.
MSPM0 无传感的 FOC 调优用户指南	本调优用户指南提供了设置 MSPM0 MCU 和支持的 DRV 硬件板的分步指导，以便对三相无刷直流电机进行调优。
2MTR-DYNO	2MTR-DYNO InstaSPIN-FOC™ 评估模块
LP-XDS110	XDS110 LaunchPad™ 开发套件调试器
FFSD-05-D-06.00-01-N	Samtec™ 编程电缆

软件

MSPM0-SDK	MSPM0 软件开发套件 (SDK)
---------------------------	--------------------

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI), [汽车智能执行器应用简报](#)
- 德州仪器 (TI), [带主控状态超时和扩展故障保护功能的 TLIN4029A-Q1 汽车级 LIN 收发器数据手册](#)
- 德州仪器 (TI), [DRV8363-Q1 具有精确电流检测和高级监控功能的 48V 电池三相智能栅极驱动器数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [带 CAN-FD 接口的 MSPM0G350x-Q1 汽车混合信号微控制器数据手册](#)
- 德州仪器 (TI), [MSPM0 无传感器 FOC 调谐用户指南](#)

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](#)。

商标

TI E2E™, Code Composer Studio™, InstaSPIN-FOC™, and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments. Samtec™ is a trademark of Samtec Inc.

Teknic® is a registered trademark of Teknic Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

FABIAN BARTH 是一名技能高超的系统工程师，服务于德州仪器 (TI) 的汽车车身系统工程团队。在这一职位上，他在为汽车行业开发尖端参考设计方面发挥着关键作用。凭借在智能电机、远程控制边缘节点、单对以太网、数据线供电以及硬件时间同步等领域的丰富专业知识，Fabian 能胜任其本职工作。

他拥有德国兰茨胡特应用科学大学的电气工程硕士学位，这体现了他在该领域的卓越学术成就和精湛技艺。

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