

## Application Note

# 基于 TI 航天增强型产品 (-SEP) 和航天产品 (-SP) 的高度可扩展性航天电机控制平台



Michael Seidl

## 摘要

本应用手册介绍了一个用于卫星和航天器传动器系统的完整航天级电机控制平台，主要面向航空航天系统设计人员和电力电子工程师。该解决方案围绕 TI 的耐辐射 F28377D-SEP MCU 和 TPS7H6101-SEP GaN 半桥功率级，以及包括 INA901-SP、TMP9R00-SP、TPS7H5020-SEP/SP 和 TPS7H1121-SEP/SP 在内的耐辐射监测和电源管理器件构建，解决了从 LEO 到 GEO 太空任务所面临的 SWaP+C 挑战。该平台支持单 2 相和 3 相步进电机或双电机配置，采用梯形或磁场定向控制 (FOC)，并通过引脚兼容的元件在不同的耐辐射等级之间进行扩展。基于 MATLAB®/Simulink® 模型的设计加速了软件开发，而 GaN 技术和高度器件集成则最大限度地缩小了板面积，降低了热开销。工程师可从单个可扩展的研发投资中受益，该投资可满足大容量和深太空应用的可靠性和尺寸需求。

## 内容

1 简介.....	2
2 详细说明.....	3
2.1 设计概念.....	3
3 硬件设计详细信息.....	5
3.1 功率级.....	5
3.2 电流检测.....	7
3.3 温度监测.....	8
3.4 每功率级面积估算.....	8
3.5 连接 F28379D LaunchPad.....	8
3.6 软件设计.....	10
4 结果.....	12
4.1 热性能.....	13
5 总结.....	16
6 参考资料.....	16

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

下一代航天任务需要高性能、紧凑的电机控制系统，在提供卓越可靠性的同时，能最大限度降低尺寸、重量、功耗和成本 (SWaP+C)。本应用手册展示了一个完整的航天级电机驱动平台，其特色是突破性的基于 GaN 的功率级器件，由运行基于模型设计软件的耐辐射高性能 MCU 控制。

主要优势包括：

- 设计系列中的首款器件，额定电压高达 200V 的耐辐射 [TPS7H6101-SEP](#)，自保护式 GaN 半桥功率级，提供卓越的功率密度和效率
- 耐辐射 [F28377D-SEP](#) 实时 MCU：
  - 提供高达 800MIPS 的处理能力，具有卓越的模拟集成度，例如四个 16 位 ADC 或八个带有集成 12 位 DAC 的窗口比较器。
  - 全面的自诊断和监控功能
  - 支持使用 MATLAB® 和 Simulink® 进行基于模型的系统工程 (MBSE)
- 耐辐射 [INA901-SP](#) 电流检测放大器，可承受 -15V 至 65V 的共模电压
- 耐辐射 [TMP9R00-SP](#) 提供多达八个远程温度监测功能和一个高精度本地温度监控功能。
- [PMP23546](#) 2.4W PSR 反激式偏置电源、基于耐辐射 [TPS7H5020-SEP](#) 或耐辐射 [TPS7H5020-SP](#)，输入电压范围为 22V 至 36V，可生成两个纹波小于 1% 的 12V 输出轨。耐辐射精密可编程基准 [TL1431-SP](#) 为启动电源提供所需的高达 36V 的输入稳压器。
- 耐辐射 [TPS7H1121-SEP](#) 或耐辐射 [TPS7H1121-SP](#) 低压降线性稳压器 (LDO) 器件可提供 3.3V 和 5V 电源轨。
- 耐辐射 [TPS7A4501-SP](#) 低压降线性稳压器 (LDO) 为 [TMP9R00-SP](#) 提供 2V 电源轨。
- 耐辐射 [SN54SLC8T245-SEP](#) 八位 0.65V 至 3.3V 方向控制型电平转换器可确保 PWM 信号完整性，并提供额外级别的保护。

上述所有功能都已在一个高度可扩展的参考设计平台中实现，该平台支持单 2 相和 3 相步进电机或双电机控制配置，兼容梯形或磁场定向控制 (FOC)。引脚兼容的安装选项可满足 LEO 或最高 GEO 任务要求，通过单次研发投入解决大批量 LEO 部署和深太空任务的独特难题。

本应用手册的目标是展示该解决方案的以下价值主张：

设计简便高效，同时高度可靠：

- 基于 Matlab Simulink 模型的编码能够以非常高的软件完整性级别非常快速地适配定制电机驱动应用。
- 所建议的元件提供了非常高水平的保护和监控功能，可将硬件设计开销降至最低。

小巧的外形：

- GaN FET 技术、高集成度以及航天级塑料封装的使用，实现了非常小的板面积需求、高效率和令人信服的热性能。

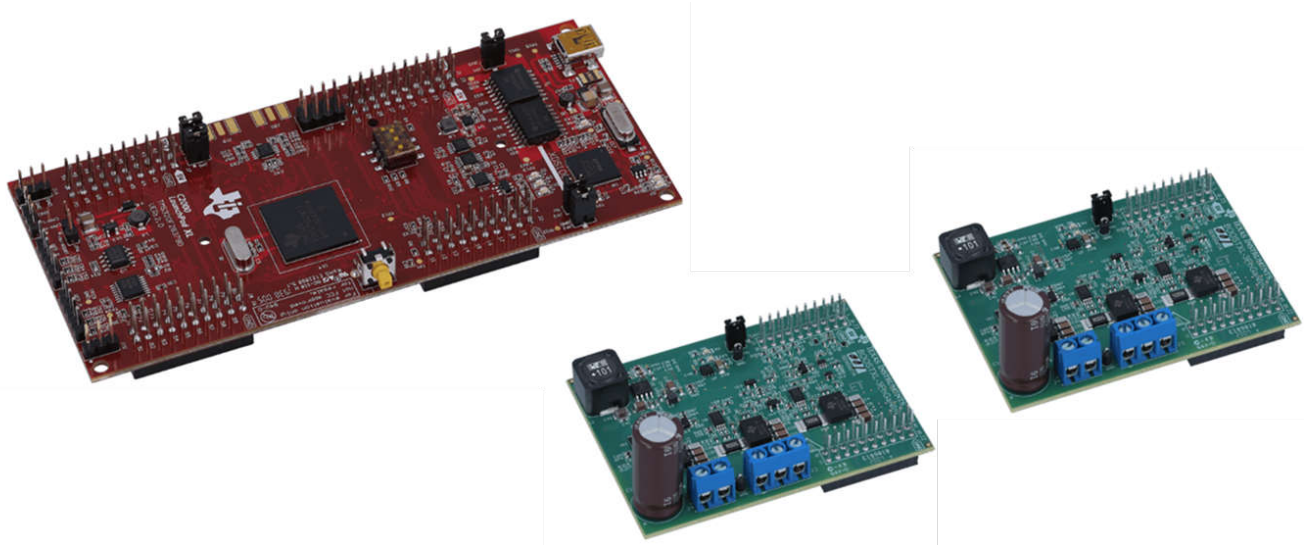
规模经济：

- 在耐辐射能力、电机数量和类型、电机控制选项以及电压和功率水平方面具有高度可扩展性。

## 2 详细说明

### 2.1 设计概念

所描述的航天级电机控制平台利用了 C2000 MCU 系列全面的设计开发生态系统。硬件基于 C2000 MCU Launchpad EVM [LAUNCHXL-F28379D](#)，它允许连接各种所谓的应用特定 **Booster Pack**，例如 [BOOSTXL-3PHGANINV](#)，这是一款带有基于分流器的在线电机相电流检测评估模块 ( [图 2-1](#) ) 的 48V 三相逆变器。



**图 2-1. 由一块 LAUNCHXL-F28379D 和两块 BOOSTXL-3PHGANINV 组成的商用评估套件构成了此航天级设计的基础**

凭借其软件和彼此的引脚兼容性，该 Launchpad 可为 TMS320F2837x 系列的所有器件 ( [包括航天级成员 F28377D-SEP](#) ) 提供出色的评估平台。然而，[BOOSTXL-3PHGANINV](#) Booster Pack 是纯商用级实现，需要重新设计以容纳所提及的航天级器件。尽管如此，用于 [LAUNCHXL-F28379D](#) 和 [BOOSTXL-3PHGANINV](#) 组合的现有电机控制软件可以完全重用于航天级应用。

因此，航天级功率级设计最大限度兼容 [BOOSTXL-3PHGANINV](#) 原有架构。对于航天级功率级 PCB，决定将单个功率级的数量加倍到六个，以实现双三相电机控制或单 2 相或 3 相步进电机实现 ( [图 2-2](#) )。

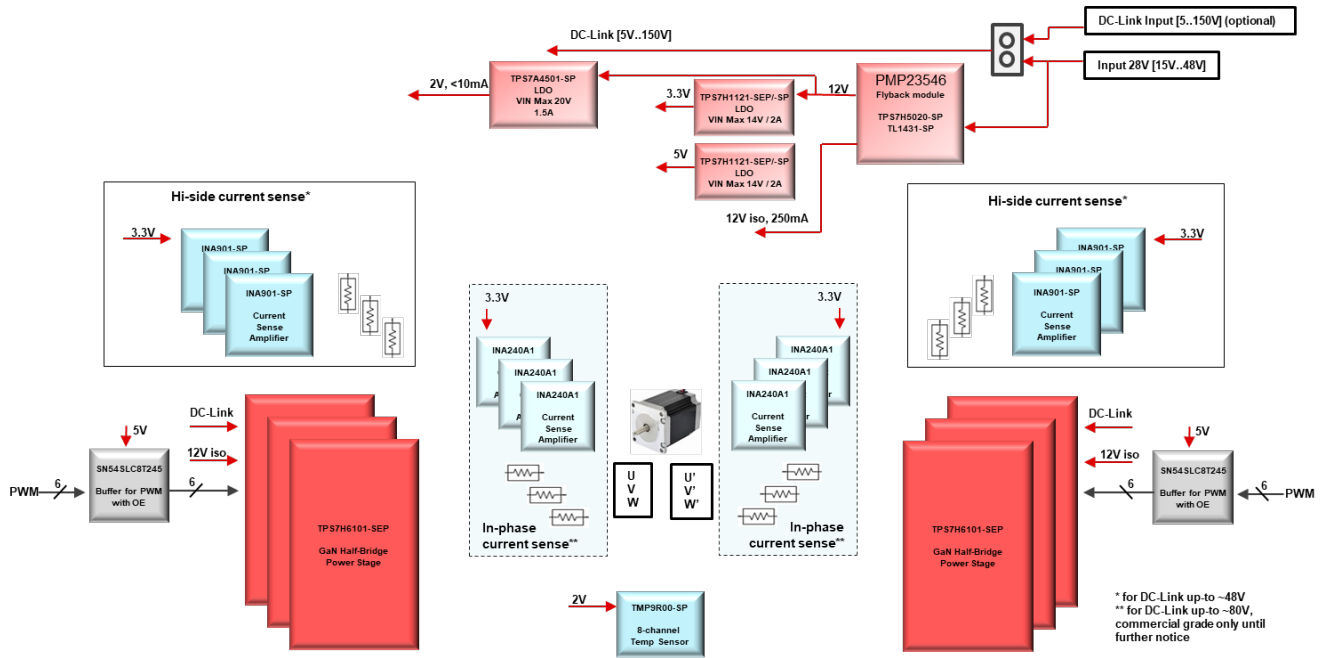


图 2-2. 航天级电机驱动 Booster Pack 的系统方框图

## 3 硬件设计详细信息

### 3.1 功率级

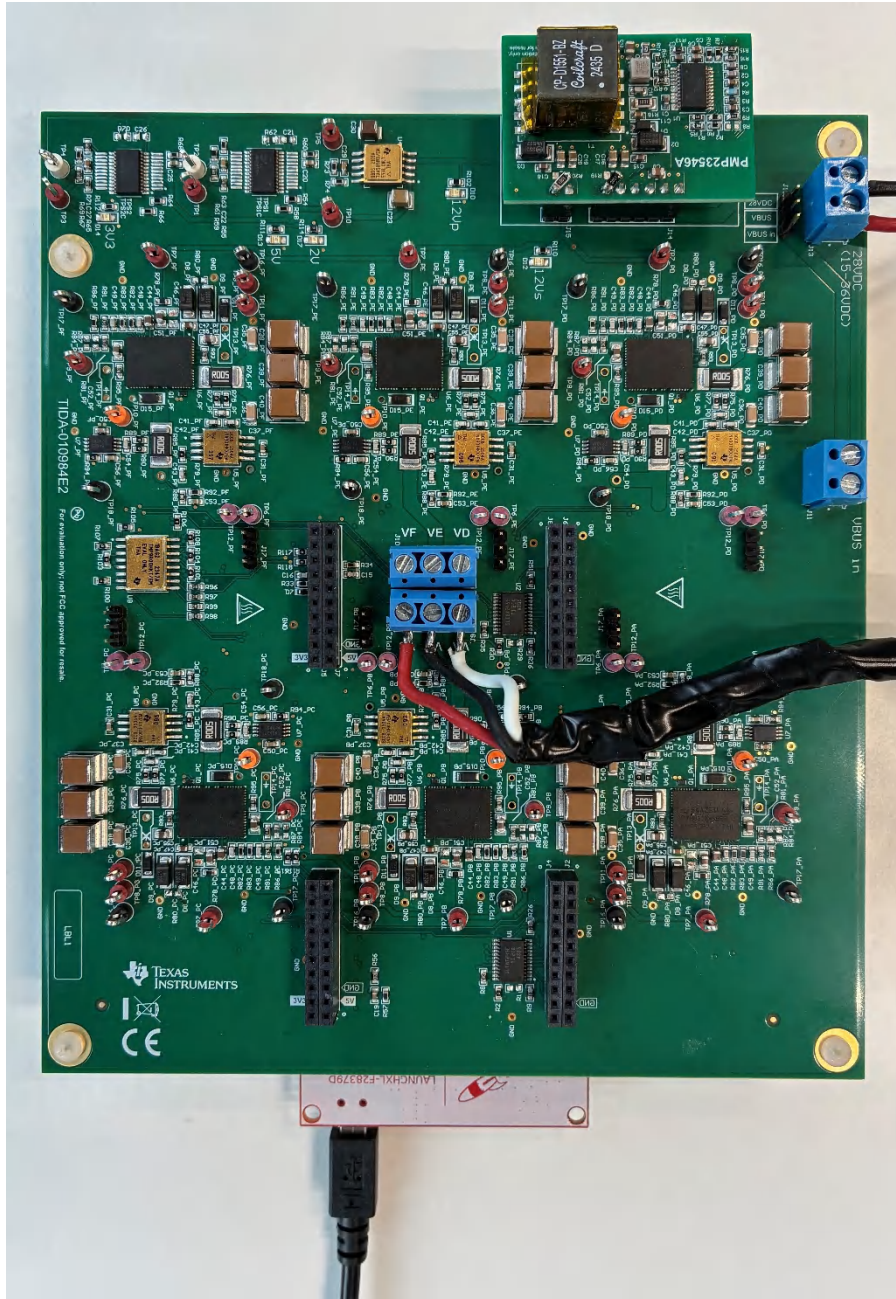


图 3-1. TIDA-010984 设计，采用 2.4W PSR 反激式偏置电源（右上角）和 LAUNCHXL-F28379D（下方）

六个半桥功率级基于 TPS7H6101-SEP。它是一个耐辐射的 200V GaN 功率 FET 半桥，集成了从底层设计的耐辐射栅极驱动器。相同的栅极驱动技术也可作为一系列分立半桥驱动器提供：[TPS7H6003-SP](#)、[TPS7H6013-SP](#)、[TPS7H6023-SP](#)、[TPS7H6005-SP](#)、[TPS7H6015-SP](#)、[TPS7H6025-SP](#)、[TPS7H6005-SEP](#)、[TPS7H6015-SEP](#)、[TPS7H6025-SEP](#)。这提供了具有高拉灌电流能力的分离输出、专用的高-低和低-高死区配置，以及高侧与低侧开关之间的低延迟匹配，以实现最佳的开启和关断开关行为。此外，它展示了非常出色的单粒子效应性能（SET、SEFI、SEL），并已验证在高达  $75 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$  条件下无交叉传导事件。借助 TPS7H6101-SEP，所有这些能力都以完全集成的半桥功率级形式提供，其中包含功率 GaN FET，使设计人员能够非常轻松地实现高度



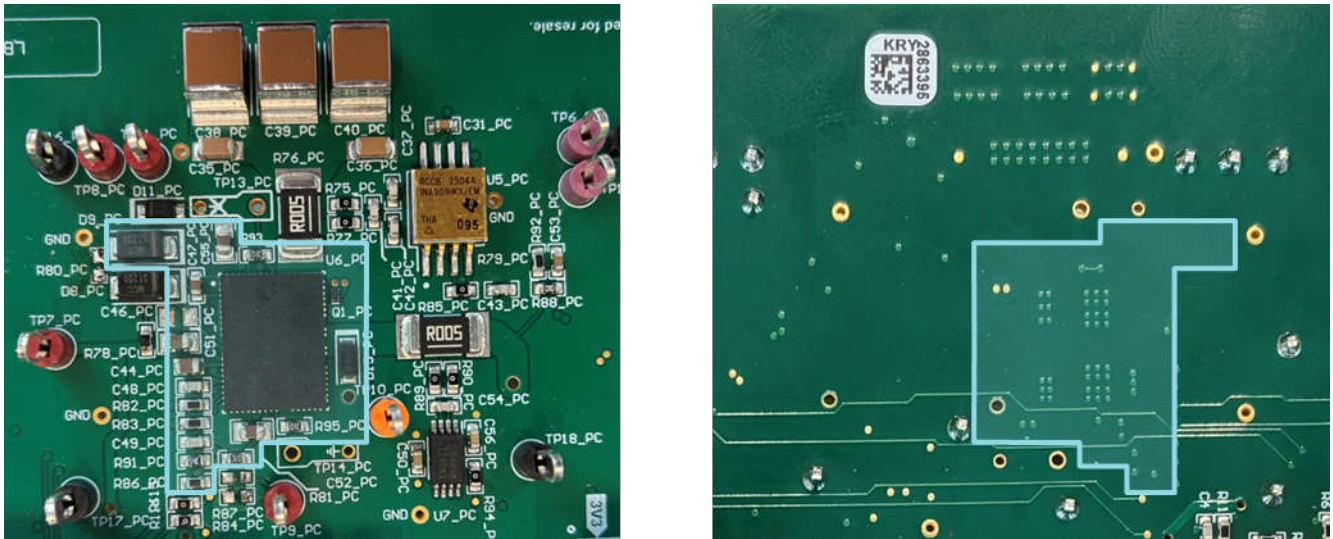


图 3-3. 左图：TPS7H6101-SEP 布局的顶视图。仅需要非常有限数量的外部元件。底部无元件（右图）。

### 3.2 电流检测

基于商用级 INA240A1 的同相电流检测电路从 BOOSTXL-3PHGANINV 继承而来，以使航天级功率级尽可能接近其父设计配置，从而以最少的软件更改实现轻松的上板调试。

添加了基于 INA901-SP 的高侧电流检测选项，因为它通常用于步进驱动器，在某些情况下也用于三相电机应用，以实现接地故障检测能力（图 3-4）。如果需要较低的耐辐射性（例如在 LEO 星座中），则建议使用 INA951-SEP。

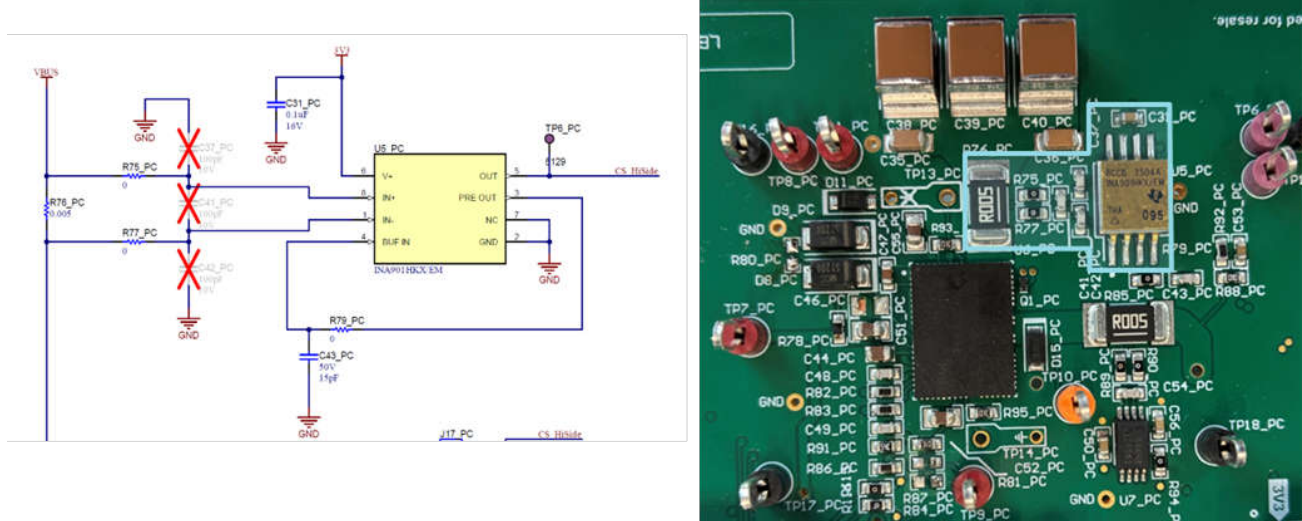


图 3-4. 基于 INA901-SP 的高侧电流检测选项

TI 提供的替代航天级同相电流检测解决方案基于 INA951-SEP 或 INA901-SP，添加了恒流源（INA901-SP 的双向拓扑）、OPA4H199-SEP/-SP，用于高达 40V 的共模输入电压，或 INA1H94-SEP/-SP 与 OPA4H199-SEP 或 OPA4H014-SEP 组合，用于 -150V 至 +150V 的共模输入电压。

### 3.3 温度监测

**TMP9R00-SP** 能够通过单个元件监控所有六个功率级的温度。实际的温度传感器位于每个功率级器件附近，通过采用二极管配置的小型且具有成本效益的 BJT 晶体管来实现（图 3-5）。**TMP9R00-SP** 中集成了激励电流生成、多个信号调节特性、电压基准和模数转换。来自所有远程传感器和器件内部本地传感器的温度值通过 I2C 总线传输到 MCU。两个可编程报警信号 **THERM** 和 **THERM2** 也连接到 MCU 的 GPIO，用于产生外部中断。



图 3-5. 在每个 **TPS7H6101-SEP** 功率级器件附近使用二极管配置的 BJT，实现小型且具有成本效益的温度监控

### 3.4 每功率级面积估算

- **TPS7H6101-SEP** 封装本身尺寸为  $12\text{mm} \times 9\text{mm} = 110\text{mm}^2$ 。外部无源元件（保护性肖特基二极管、齐纳自举二极管、配置电阻、电容、温度感应晶体管等）总计  $120\text{mm}^2$ 。每个功率级模块总计  $230\text{mm}^2$ 。
- 对于高侧电流检测方案，**INA901-SP** 本身占  $85\text{mm}^2$ ，分流电阻和无源元件大约再占相同面积： $170\text{mm}^2$
- 大量的大容量电容器额外增加  $200\text{mm}^2$
- 单个 **TMP9R00-SP** 器件支持双三相电机实现中的所有六个功率级，自身增加  $70\text{mm}^2$ 。其外围无源元件再贡献约  $100\text{mm}^2$ ，用于提供所需 2V 电源电压的 LDO 再占  $140\text{mm}^2$ （图 3-6 中心）。每功率级总计约  $50\text{mm}^2$ 。

对于所有元件仅安装在 PCB 单面且使用相当多大容量电容器的布局，每功率级总计约  $550\text{mm}^2$ 。对于 12V、5V 和 3.3V 公共电压轨（图 3-6），该设计显示以下板面积需求：

- 用于从非稳压 28V 总线到 12V 的 DC/DC 转换的 **PMP23546** 模块占  $1640\text{mm}^2$ 。
- 用于 5V 和 3.3V 电源的两个 **TPS7H1121-SEP/SP** LDO 各占  $130\text{mm}^2$ 。

具有六个功率级的设计真正所需的总面积合计为  $5810\text{mm}^2$ 。例如，这样的设计可适用于  $85\text{mm} \times 70\text{mm}$  的 PCB

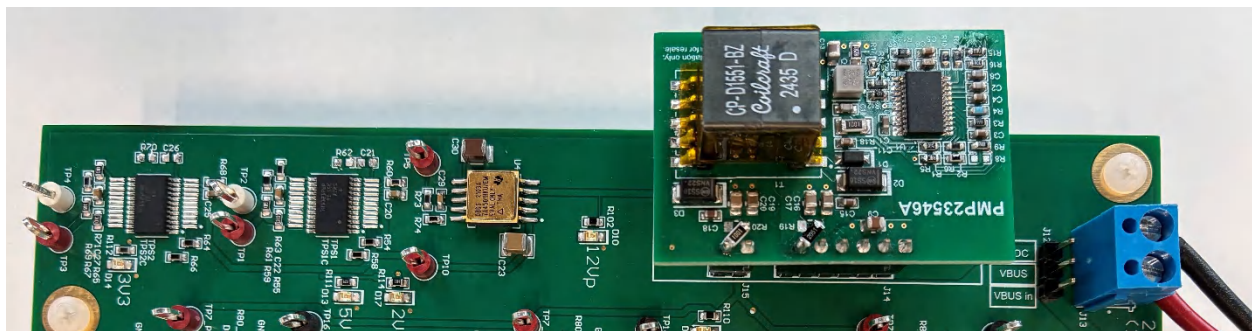


图 3-6. 电源树设计（从左到右）：**PMP23546**（15V-36V 输入，12V 输出），**TPS7A4501-SP**（12V 输入，2V 输出），两路 **TPS7H1121-SEP/SP**（12V 输入，5V 和 3.3V 输出）

### 3.5 连接 F28379D LaunchPad

**F28379D** Launchpad 连接到功率级 PCB 的背面（图 3-7），并通过 USB 调试接口由 PC 供电，同时安装相应的跳线接头（图 3-8）：

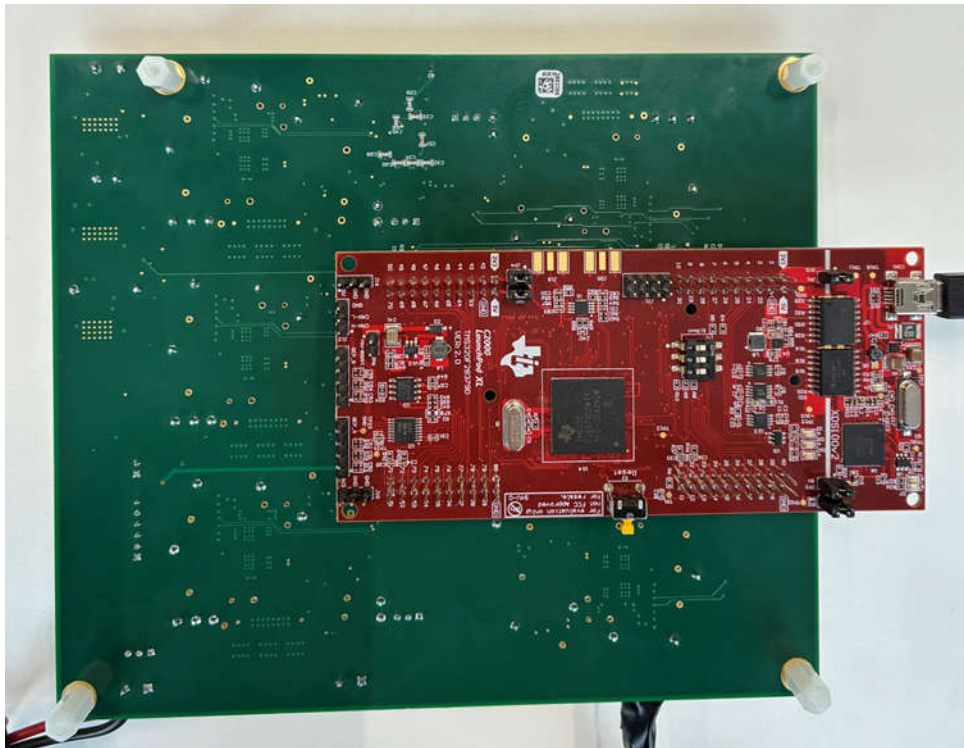


图 3-7. F28379D Launchpad 连接到功率级 PCB 的背面

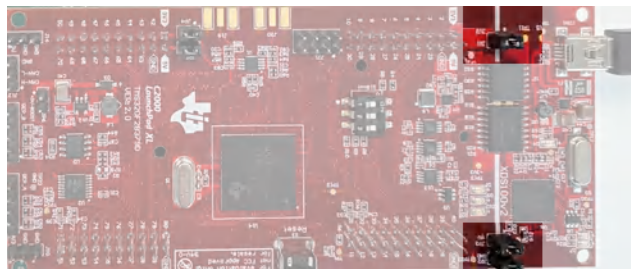


图 3-8. 通过安装跳线 J1、J2 和 J3，MCU 电路板通过 USB 端口供电，独立于功率级设计

### 3.6 软件设计

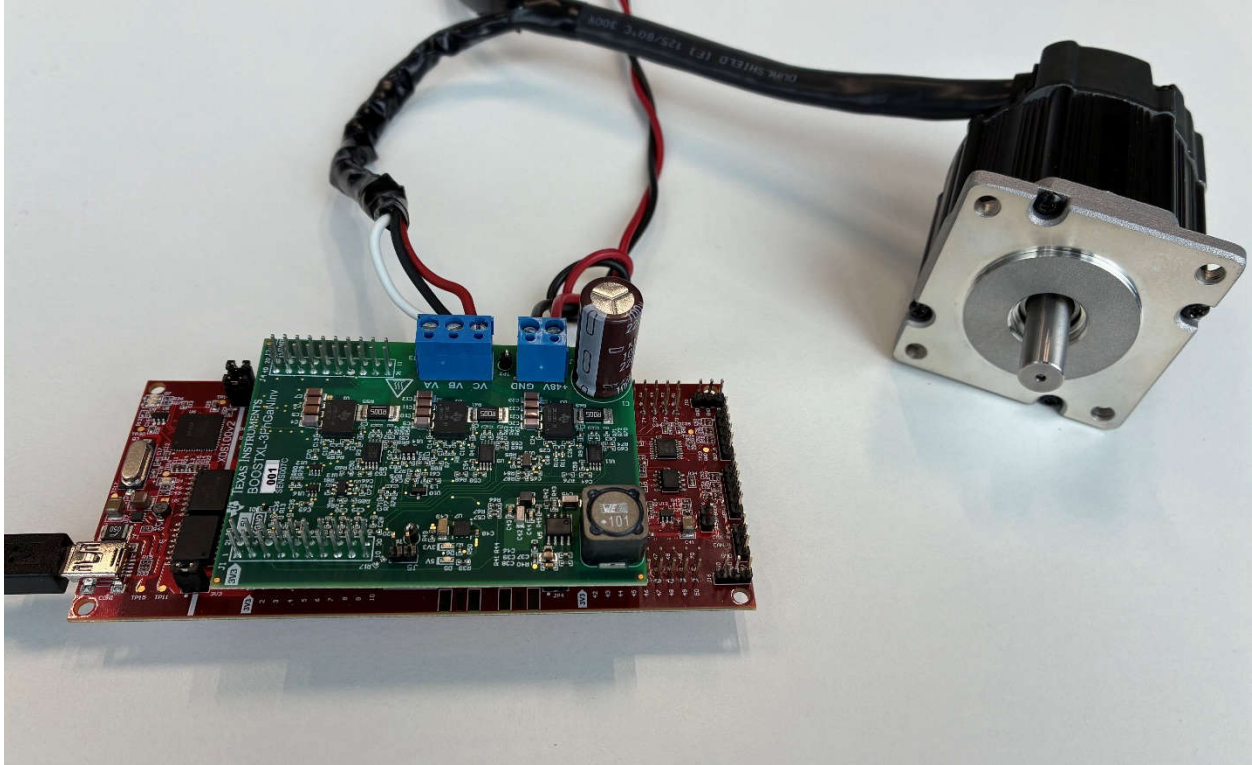


图 3-9. LAUNCHXL-F28379D、BOOSTXL-3PHGANINV 和 LVSERVOMTR，由 Mathworks 基于 Simulink 模型的无传感器 FOC 实现支持

该设计基于商用硬件套件 ( [LAUNCHXL-F28379D](#)、[BOOSTXL-3PHGANINV](#) 和 [LVSERVOMTR](#) ) ( 图 3-9 )，并得到 Mathworks 网站上提供的基于 Simulink 模型的无传感器 FOC 实现的全面支持：使用 [C2000 处理器实现 PMSM 的无传感器磁场定向控制 - MATLAB 和 Simulink](#)。航天级设计的目标是尽可能利用这一现有且经过充分验证的套件。但是，为了获得出色稳健性，TPS7H6101-SEP 功率级设置为单 PWM 模式。因此，需要对模型进行两处小幅修改。TPS7H6101-SEP 期望在其“低侧”输入 PWM 引脚上接收单 PWM 信号。高侧 PWM 输入引脚转变为两个 FET 驱动器的通用使能引脚。这导致需要将 BOOSTXL-3PHGANINV 原始配置 ( 每个半桥功率级有两个独立 PWM 信号 ) 中的高侧 PWM 信号连接到航天级设计中的低侧连接。对于每个功率级器件的使能信号，三个额外的 GPIO 与已实现的通用逆变器使能逻辑一起被激活 ( 图 3-10 )。

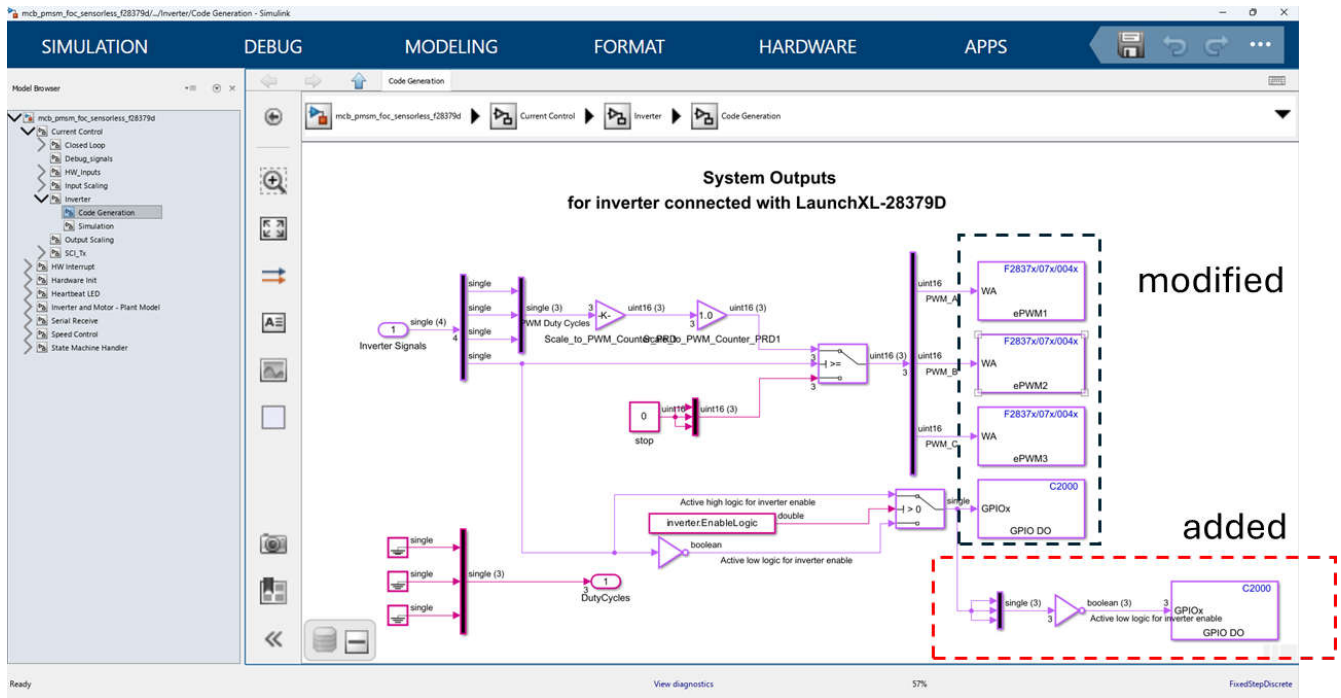


图 3-10. 仅在 Simulink 模型中进行微小修改即可启用单 PWM 模式

应用这几项更改后，模型可以被编译、构建并加载到 MCU 中。无需更改 PC 上运行的主机模型，即可通过 GUI 在 MCU 上运行此更新代码来控制电机。

## 4 结果

通过上述更改，整个系统实现证明在开环和闭环无传感器 FOC 中都能按预期平稳运行。

该实现在速度低于 300rpm 时以开环运行。为了检查功率级信号波形、电流检测精度和死区时间配置验证，直流链路电压设置为 28V，速度设置为 100rpm (开环)。

图 4-1 显示了关断高侧开关并启用低侧开关的代表性波形。相电流对应于 INA240A1 电流传感器的输出电压。请注意，电流传感器提供的是进入电机相的实际电流的反相表示，因为在设计中为了优化布局而交换了 IN+ 和 IN-。进入示波器的电流测量信号输入已被反相，其偏移量已经过调整，以在中心水平线处显示零相电流。图 4-1 显示了进入电机的小正电流。在死区时间内，随着小绕组电流对开关节点放电，开关节点电压缓慢降至地。当低侧栅极开启以主动将开关节点拉至地时，该节点已几乎放电至零伏，这几乎可以称为软开关事件。已按照数据表的建议，通过连接到  $R_{HL} = 57.6k\Omega$  的外部电阻器配置死区时间。观察到的 41ns 与数据表中规定的 36ns 至 53ns 范围 (典型值 44ns) 一致。

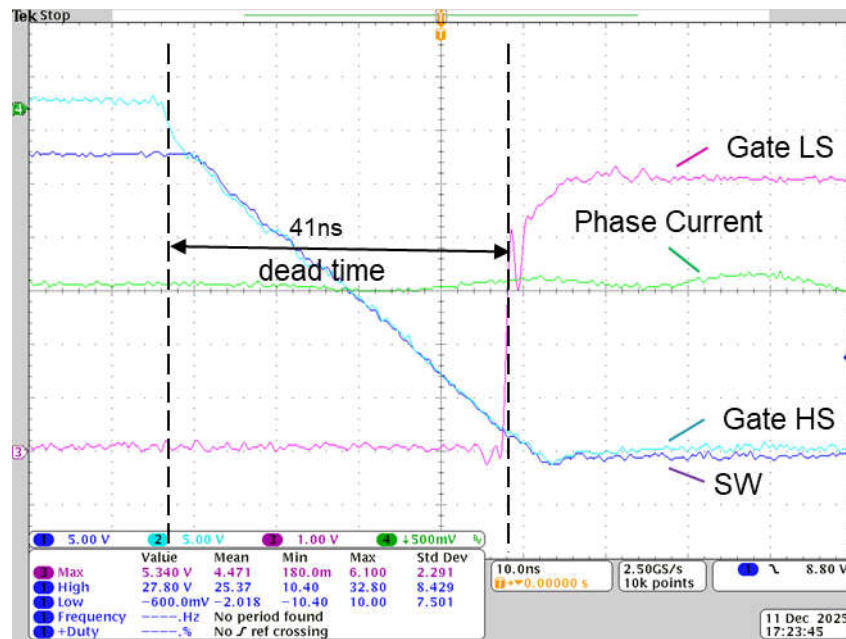


图 4-1. 死区时间验证从高到低转换

图 4-2 显示了从低到高转换切换的相反场景。已按照数据表的建议，通过连接到  $R_{LH} = 35.7k\Omega$  的外部电阻器配置死区时间。观察到的 36ns 与数据表中规定的 20ns 至 37ns 范围 (典型值 30ns) 一致。

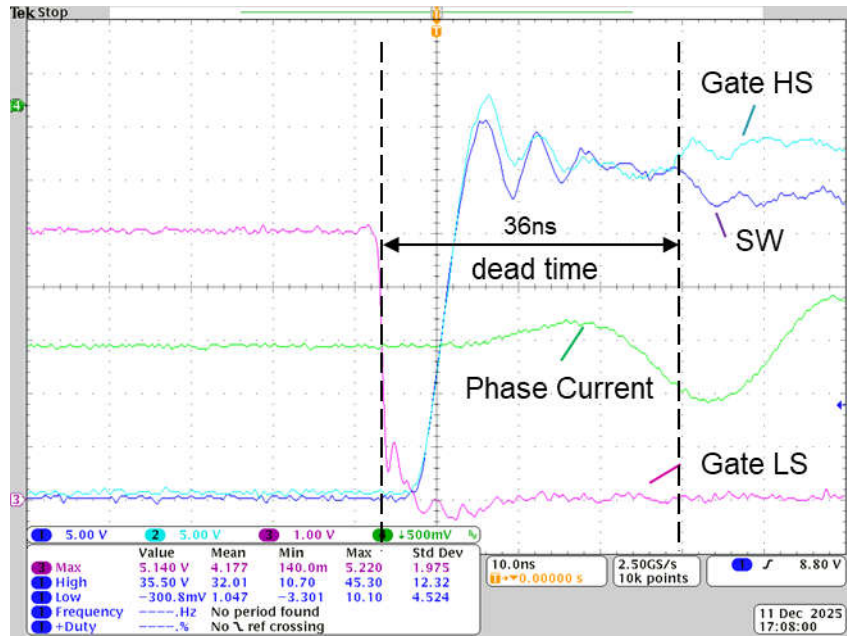


图 4-2. 死区时间验证从低到高转换

#### 4.1 热性能

在开环下运行电机控制，即使电机没有任何负载，也允许向电机注入高电流。

在开环下以 100rpm 转速、28V 直流链路电压运行 Teknic M-2310P-LN-04K 电机，会产生 4Arms 的相电流。这可以通过电流钳或读取 INA240A1 电流传感器输出来测量。

图 4-3 显示，在 24°C 室温且无强制通风的条件下，以连续 (>15 分钟) 4A rms 相电流运行时，功率级仅产生非常微小的温升。

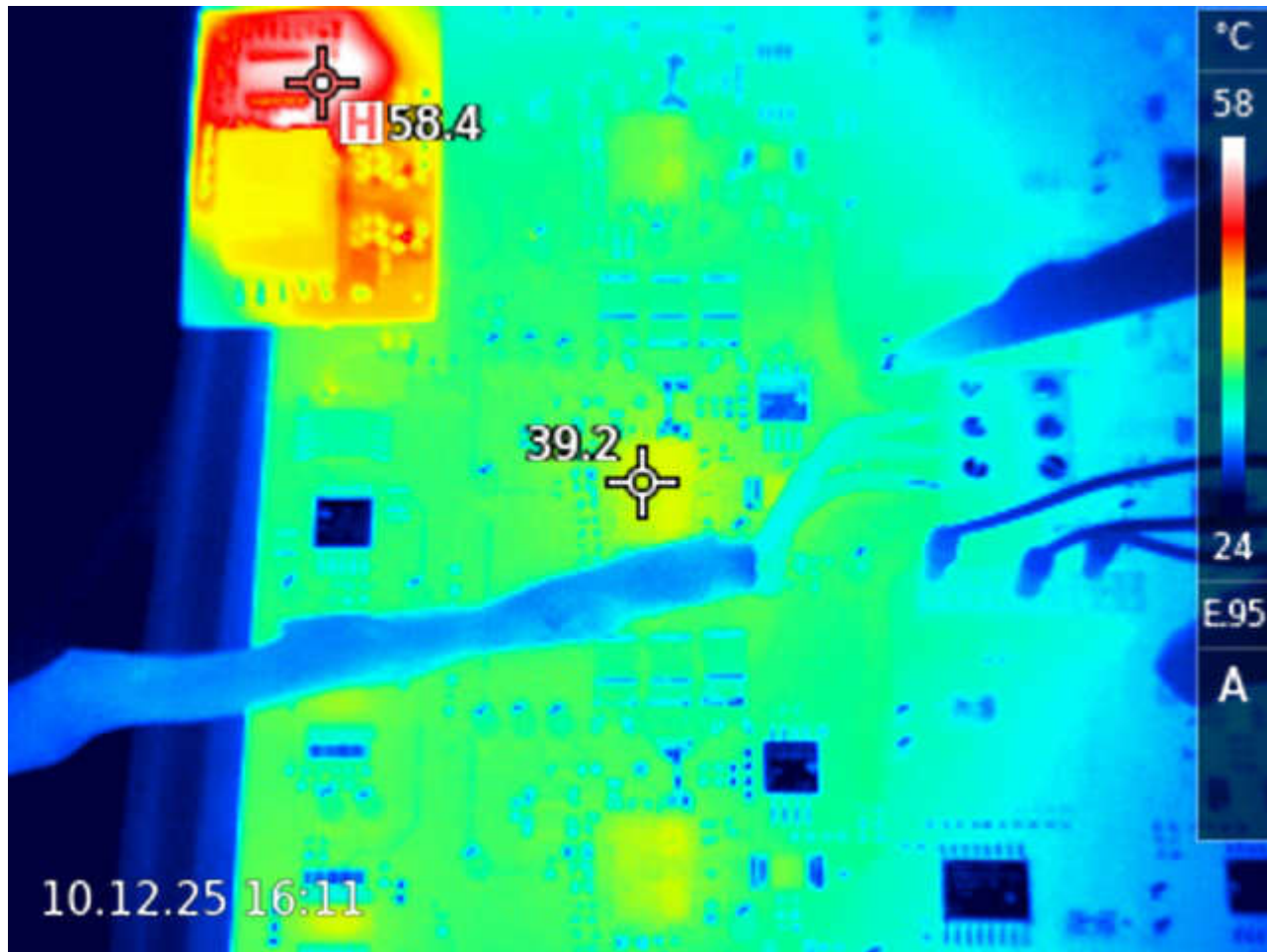


图 4-3. 4A RMS 相电流连续 (>15 分钟) 运行时的功率级设计热分布图

对于应力测试，选择了一款功率更大、绕组电阻更低的电机：Moons 交流伺服电机 - SM0803DE2-KCF-NNV。在 50rpm (开环) 下将直流链路电压升高至 33.1V，建立了 11Arms 的相电流。图 4-4 显示了 11Arms 连续运行 15 分钟后的热分布图。温度确实如预期上升，但在 24°C 室温且无强制通风的条件下稳定在 120°C 以下。

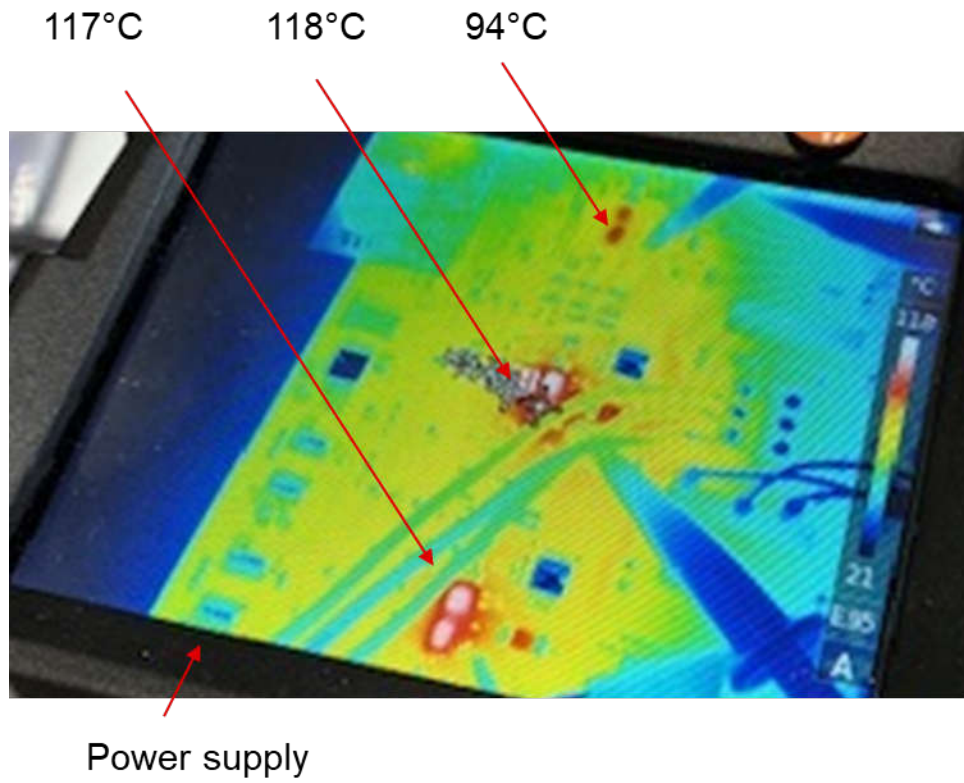


图 4-4. 11A RMS 相电流连续 (>15 分钟) 运行时的功率级设计热分布图

## 5 总结

所示设计通过三个独立的 GaN 功率级和在 TMS320F28377D-SEP 上运行的 MATLAB/Simulink 集成，验证了系统能力。该设计包括一个从非稳压 28V 电源轨开始的全面电源管理解决方案，采用 PMP23546 反激式设计并通过 TPS7Hxxx-SEP 系列元件进行负载点调节，确保向所有系统元件可靠输送电力。

该系统基于航天级元件以及各种监测和保护功能，包括基于 TMP9R00-SP 的温度监控。在许多情况下提供引脚兼容的器件选项，因此设计可以轻松从对成本更敏感的 LEO 星座安装扩展到具有超高耐辐射性和可靠性要求的 MEO、GEO 或深太空任务。

硬件配置支持双三相电机、单 2 相步进电机或单 3 相步进电机。

Matlab Simulink 支持实现了非常快速的软件实现，同时具有非常高的完整性级别，这对于卫星电机驱动器和执行器等高可靠性系统是强制性的。

基于 GaN 的集成功率级实现了非常小的板面积。低 RDSON 表明，即使连续相电流高达 11Arms，发热量仍然非常合理。对于散热不是主要考虑因素的较小电流需求，有很大的机会通过将器件安装在 PCB 的任一侧来减小功率级的尺寸，并可能减少大容量电容器的数量。

这些结果让人确信，卫星中的大多数（即使不是全部）电机控制应用都可以基于这些 GaN 功率级器件。

## 6 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[适用于集成式电机驱动器的 TIDA-010936 48V/16A 小型三相 GaN 逆变器参考设计](#)，设计指南。

## 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