

Design Guide: TIDA-010990

具有主动电池包平衡功能的电池包级电化学阻抗谱 (EIS) 激励参考设计



说明

该参考设计采用双向隔离、多端口双有源电桥 (DAB) 直流/直流转换器，专为电池包 EIS 激励和有源电池包均衡而设计。该设计可以生成 0.04Hz 至 2000Hz 的正弦电流，振幅高达 10A。此外，该设计还支持恒流 (CC) 和恒压 (CV) 模式，可实现高效的主动电池包均衡。

资源

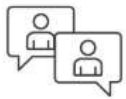
TIDA-010990	设计文件夹
TMS320F28P550SG	产品文件夹
UCC23525	产品文件夹
UCC27834	产品文件夹
AMC0311R	产品文件夹

特性

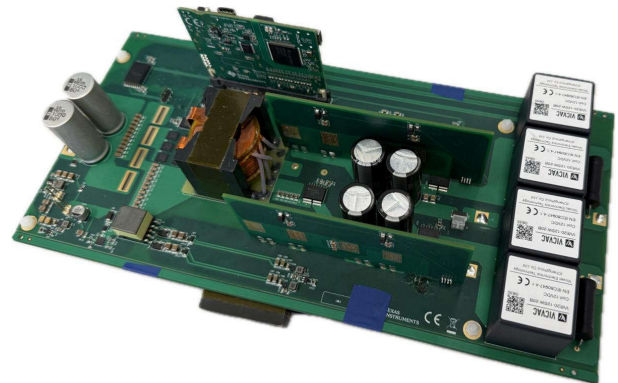
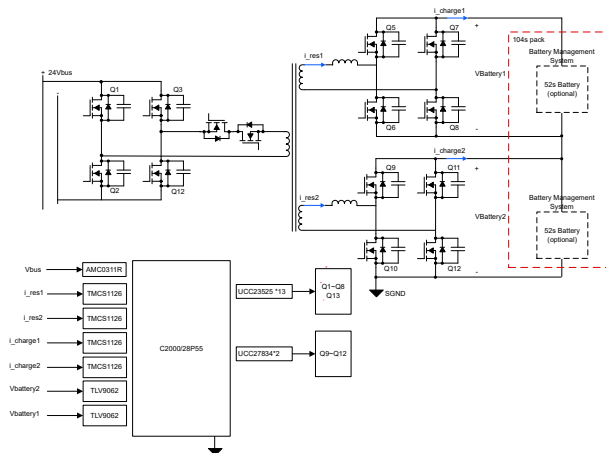
- 具有简单的单相移 (SPS) 控制方案的双向双有源电桥
- 用于 0.04Hz 至 2000Hz 正弦电流闭环控制的 PI + PR 控制
- 支持 SPI 和 CAN 通信
- 支持高达 104 芯的电池包
- 用于数字控制的 TMS320F28P55 控制器
- 一个机架可以同时执行 APB 和 EIS，对另一个机架没有影响

应用

- [ESS - 电池管理系统 \(BMS\)](#)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

储能系统 (ESS) 在可再生能源应用中发挥着重要作用。根据系统电压、容量和使用情况, ESS 可以分为三个不同类别: 住宅 ESS、商业和工业 ESS 以及电网 ESS。商业和工业以及电网 ESS 包含多个机架, 每个机架都包含多个堆叠的电池包。

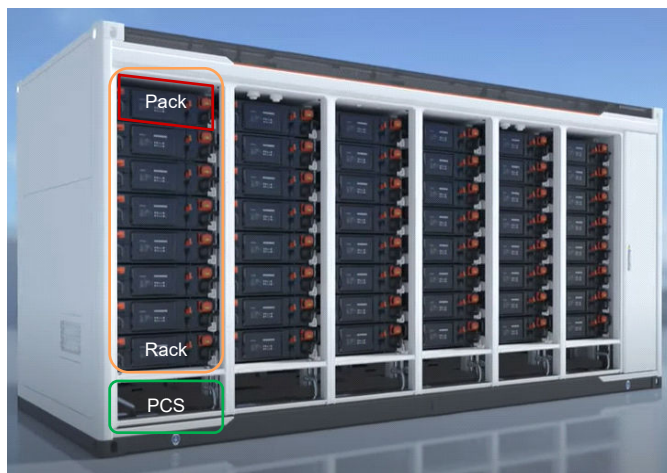


图 1-1. 电网规模 ESS 的架构

图 1-1 展示了采用分布式架构的典型电网级储能系统 (ESS)。该系统在结构上分为三个核心层:

- **电池包**: 基本能量存储单元由多个串联和并联的电池电芯组成, 由集成电池管理系统 (BMS) 管理。
- **电池架**: 通过堆叠多个电池包形成的垂直仪表组。该参考设计整合了电压和容量来满足高电网需求, 并包含电池架级控制和保护电路。
- **PCS (功率变换系统)**: 在这种高度集成的分布式拓扑中, 专用群集 PCS 直接部署在电池架底部。这种分布式配置可实现每个电池架的独立充电和放电管理, 显著减轻电芯容量不匹配 (桶形效应) 的负面影响并更大幅度地提高系统总能量产量。

电网规模高压储能系统 (HV ESS) 市场面临着一个关键安全拐点。随着电池电芯容量从 280Ah 快速增加到 684Ah, 热失控的风险和传播速度呈指数级增加。传统的管理方法主要依赖于单纯的温度监测。然而, 由于现代大型电芯的较大物理体积, 内部热异常会出现严重的热滞后, 因此表面温度跟踪不足以进行早期警告。

为了克服这一局限性, 电化学阻抗谱 (EIS) 已成为超快异常检测的最终技术解决方案。通过将诊断焦点从外部热效应转移到内部化学状态, EIS 可以测量宽频谱范围内的实时单元阻抗变化。这种技术完全绕过传统的热传播延迟, 在绝对最早的微结构阶段捕捉电芯退化和内部短路, 以确保电网规模系统的完整性。

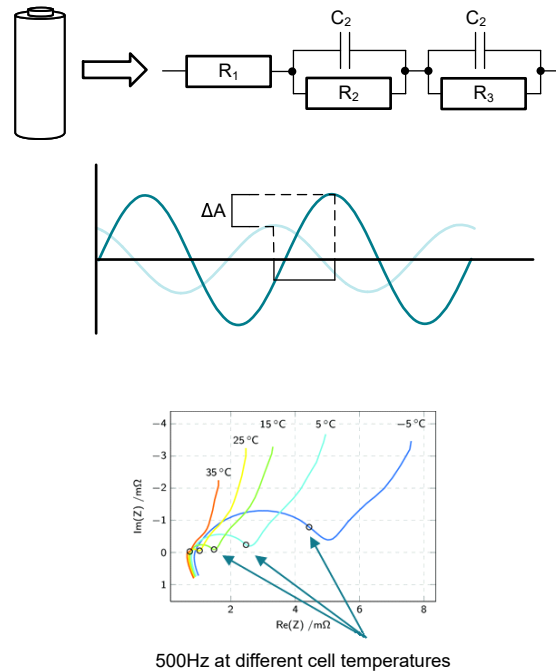


图 1-2. EIS 原理

图 1-2 显示了 EIS 的原理。从机械角度来看，EIS 的工作原理是在特定频率范围（通常为几十毫赫兹到几千赫兹）内将受控的低振幅正弦电流（或电压）扰动注入电池电芯。然后，系统会同步测量产生的正弦电压（或电流）响应。通过分析激励信号和响应信号之间的相移和振幅比，可以在每个频率点计算复杂电化学阻抗 (Z)。

从电化学的角度来看，电池不是纯电阻器，而是由表示内部物理现象（如欧姆电阻、电极接口处的电荷传输和离子扩散）的电阻、电容和电感组成的复杂网络。当大型电芯中开始出现内部短路或局部过热时，这些微观结构特性会立即发生变化。由于这些电化学阻抗变化发生在热量通过厚胶卷传导并导致表面温度骤升之前很久，因此 EIS 能够几乎瞬间检测到热失控的前兆。

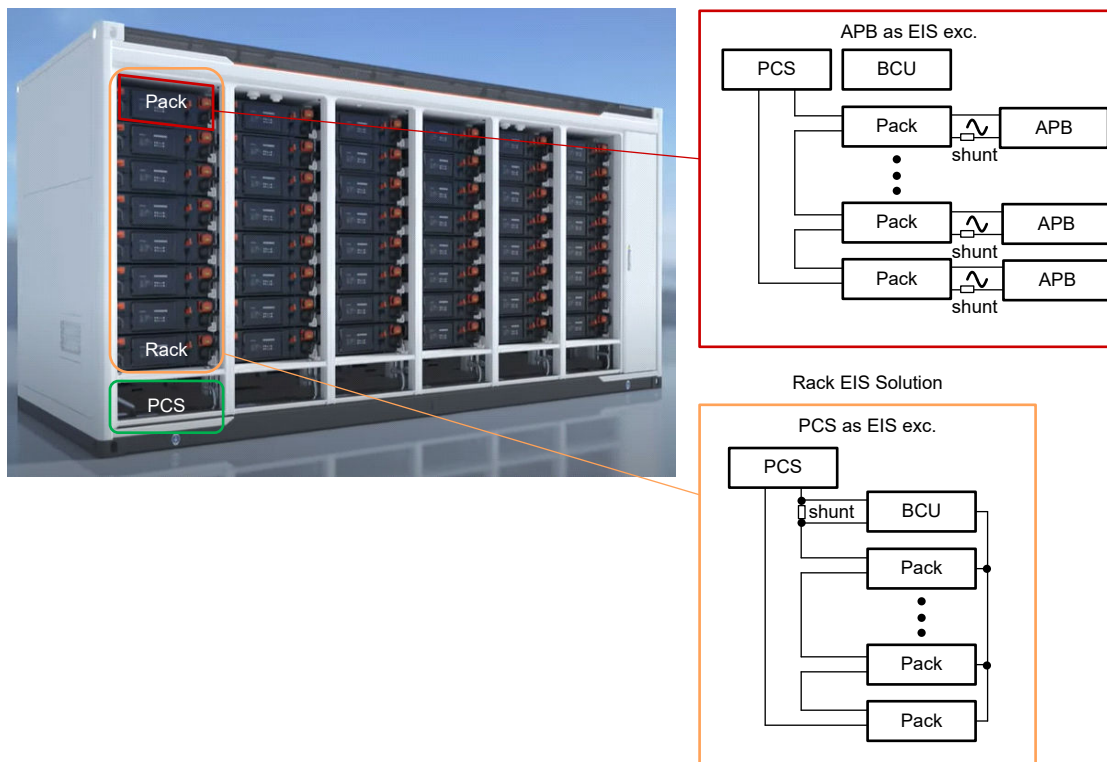


图 1-3. 电网级 ESS 中的激励

要在电网级 ESS 中实际部署 EIS，选择合适的硬件拓扑来注入正弦扰动至关重要。如图 1-3 中所示，存在两种主要的体系结构级部署方法：

- **电池架级 EIS 解决方案 (PCS 作为激励源)**：在这种集中式方法中，电池架级电源转换系统 (PCS) 直接调制整个串电流，以注入 EIS 激励信号。虽然这种方法在每个电池包上只需要很少的额外硬件，但在解决由于高压总线上的高共模电压和系统信号衰减而导致的单个大型电池的细粒度阻抗变化方面，它面临着设计挑战。
- **电池包级 EIS 解决方案 (本地转换器作为励磁源)**：这种分散式方法为每个单独的电池包部署了一个独立的局部激发板，例如主动电池包平衡 (APB) 模块。通过在本地隔离激励源，信噪比 (SNR) 得到显著提高，从而能够根据特定电池包独特的老化特性进行定制的精准确阻抗谱分析。

此参考设计仅侧重于利用高度集成的专用硬件框架的电池包级 EIS 设计。这种本地化方法的突出技术优势在于它能够将 EIS 激励源重新用于主动电池包平衡 (APB) 转换器。

在正常电网运行期间，这种双向多端口拓扑在恒流 (CC) 或恒压 (CV) 模式下工作，用于在不匹配的电池包之间重新分配能量，从而消除大型电池的典型桶形效果。当触发安全诊断时，同一硬件会动态转换以生成 EIS 分析所需的精确 0.04Hz 至 2000Hz 正弦扰动。这种双重用途融合消除了对冗余电力电子设备的需求，显著降低了总物料清单 (BOM) 成本和物理占用空间，同时更大限度地提高了系统级安全性和能效。

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 显示了这种多端口 DAB 双向隔离直流/直流设计的框图。初级和次要侧需要进行电压和电流检测。TLV9062 装置检测输出电压，TMCS1126 用于检测输出电流以执行电流回路。AMC03111R 用于检测初级电压以执行电压回路。

TMDSCNCD28P55X 控制卡支持数字控制，UCC23525 和 UCC27834 器件用作两侧的栅极驱动器。该架构具有三个全桥，其中包含次级侧 SiC、初级侧 Si mos、直流阻断电容器、谐振电感器以及一个变压器。

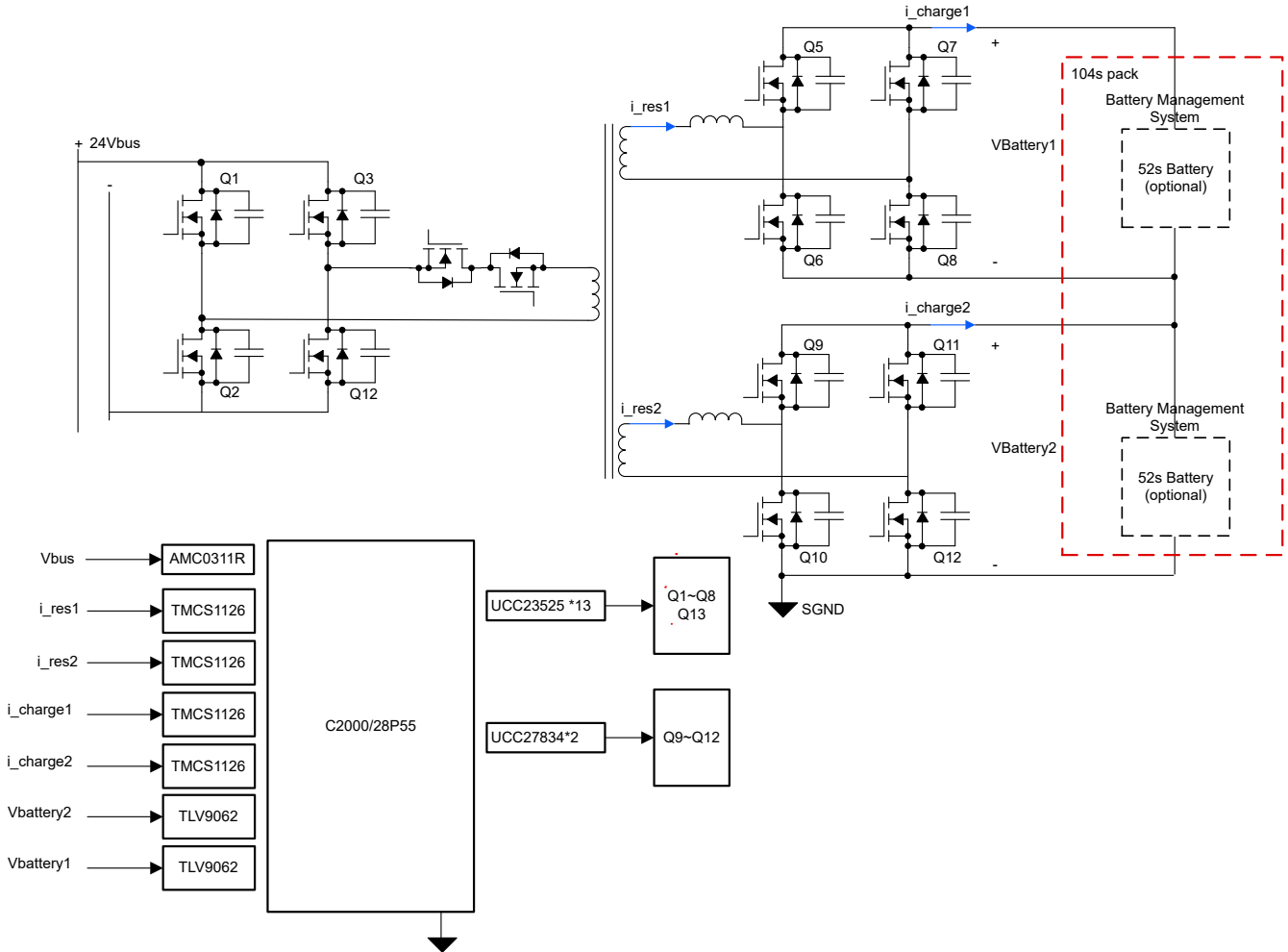


图 2-1. TIDA-010990 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 设计注意事项简介

为了实现高效的双向功率流和电隔离以实现电池诊断和平衡，选择理想的电力电子拓扑至关重要。在各种隔离式双向转换器中，图 2-2 中所示的双有源电桥 (DAB) 拓扑已成为大功率储能应用的行业标准。传统的 DAB 转换器包含初级侧的全桥逆变器、隔离变压器及次级侧的全桥整流器。通过控制初级电桥和次级电桥之间的相移角，转换器可以精确调节功率流的方向和大小。传统 DAB 的主要优点包括：

- **软开关功能：**它可以在宽工作范围内自然促进零电压开关 (ZVS)，显著降低开关损耗，并实现高频运行，从而更大限度地减小物理尺寸。
- **双向电力流动：**它可以无缝处理两个方向的能量传输，因此非常适合需要连续充电和放电循环的应用。
- **高功率密度和隔离：**高频变压器提供安全关键型电隔离，同时保持极高的功率体积比。

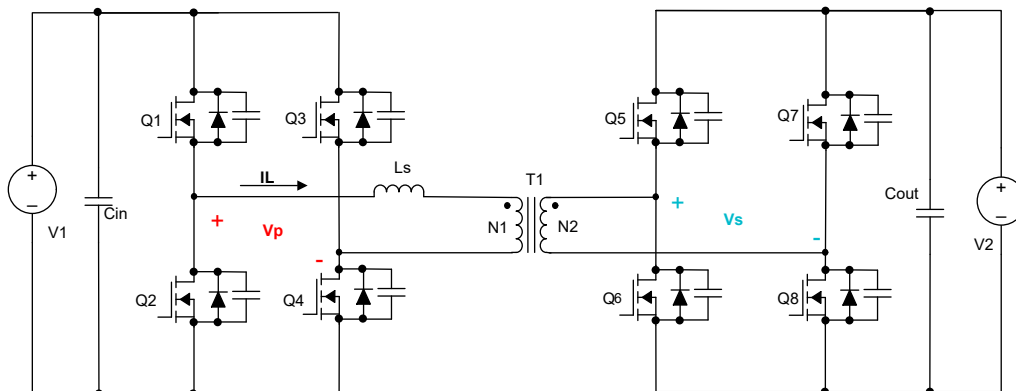


图 2-2. DAB 拓扑

多端口 DAB 拓扑通过整合通过单个多绕组高频变压器连接的三个或更多有源电桥来扩展传统设计，如图 2-3 所示。这种集成允许单个转换器同时管理多个独立电压端口之间的配电。在此设计中，多端口 DAB 拓扑用作架构内核，连接两个电池模块和辅助总线。通过控制所有活动端口之间的相对相移，可以使用极小的转换级在任何端口之间动态路由能量。这种高级拓扑不仅继承了标准 DAB 的所有软开关和高效率优势，还提供了生成精确多频 EIS 激励电流所需的多通道灵活性，同时执行主动的电池包间能量平衡。

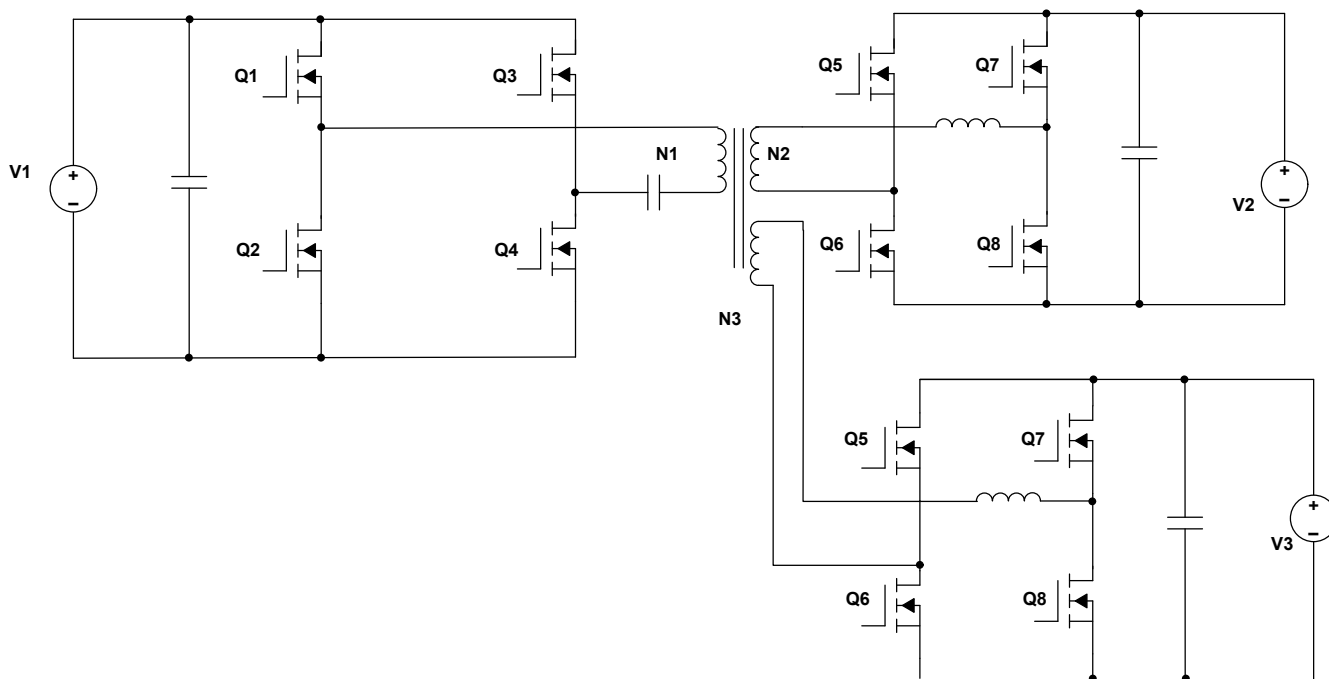


图 2-3. 多端口 DAB 的拓扑

2.2.2 DAB 的基本工作原理

单相移 (SPS) 调制是双有源电桥 (DAB) 转换器最基本并且广泛采用的控制方法。在 SPS 控制下，初级侧全桥（桥 1）和次级侧全桥（桥 2）均以固定的 50% 占空比运行。每个电桥的对角开关对（如 Q1/Q4 和 Q5/Q8）会同步打开及关闭。

该方案中的核心控制变量是外部相移角 ϕ 在初级侧方波电压 (V_p) 和次级侧方波电压 (V_s) 之间引入。该相移角直接调节通过高频隔离变压器 T1 的功率流的方向和幅度，如图 2-4 所示。

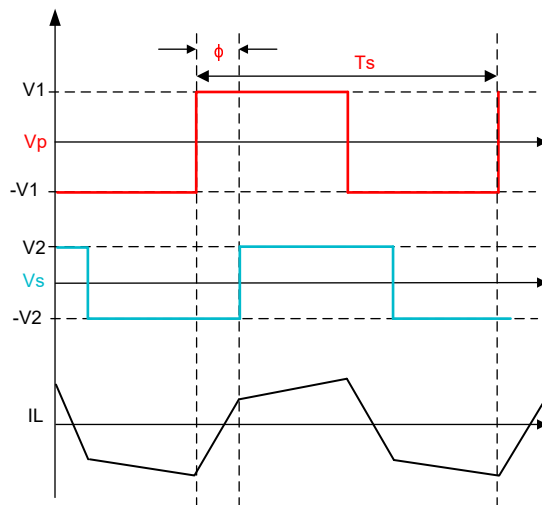


图 2-4. SPS 控制下的波形

两个电桥之间传输的平均功率 P_{12} 由串联泄漏电感 L_s 中存储和释放的能量控制，这可以通过数学公式表示为：

$$P_{12} = \frac{N \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot \phi \cdot (\pi - |\phi|)}{2 \cdot \pi^2 \cdot L_s \cdot f_s} \quad \left(-\pi \leq \phi \leq \pi \right) \quad (1)$$

其中 V_1 是输入直流电压， V_2 是输出直流电压， f_s 是开关频率， N 是变压器匝数比 ($N = N_1/N_2$)。

- 正向功率模式 ($0 \leq \phi \leq \pi$) : V_p 超前于 V_s ，导致能量从初级侧流向次级侧。
- 反向电源模式 ($-\pi \leq \phi \leq 0$) : V_p 滞后于 V_s ，导致能量从次级侧无缝流回初级侧。

最大功率能力 (P_{max}) 严格受硬件参数 L_s 和 f_s 的限制，并在相移角实现 ϕ 等于 $\pi/2$:

$$P_{max} = \frac{N \cdot V_1 \cdot V_2}{8 \cdot L_s \cdot f_s} \quad (2)$$

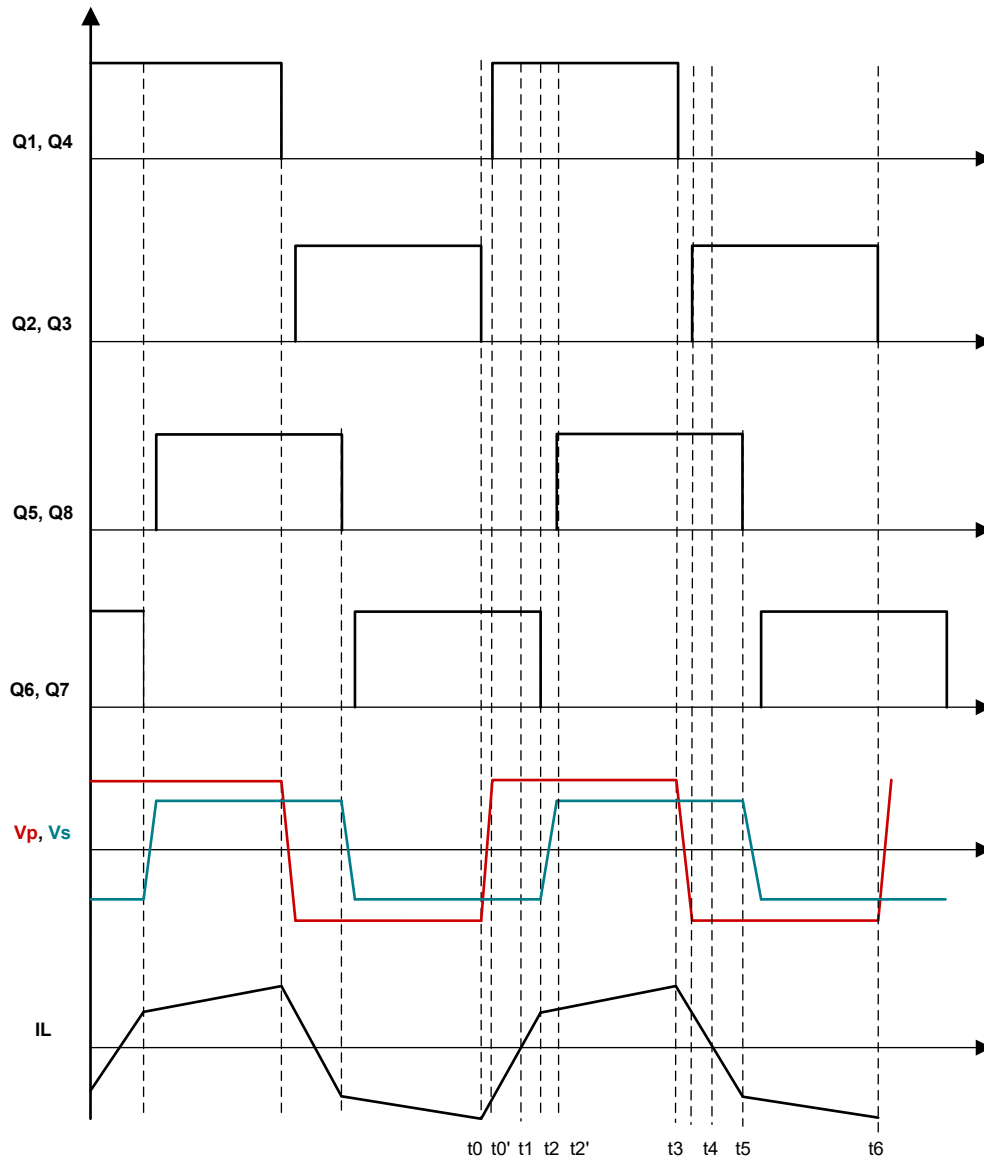


图 2-5. SPS 控制下 PWM 和电流的完整波形

为了最大限度地减少开关损耗并实现高总系统效率，SPS-DAB 完全依靠存储在漏电感 L_s 中的无功能量对 MOSFET 寄生输出电容 C_{oss} 进行放电和充电，从而促进零电压开关 (ZVS)。图 2-5 显示了 PWM 和电流的完整波形。以前进操作模式为基准，典型的开关周期执行以下关键间隔：

- **间隔 1 (t_0 至 t_0' - 死区时间实现，如图 2-6 所示)：**当在 t_0 之前时，开关 Q1 和 Q4 关闭。在此死区时间间隔期间，电感器电流 I_L 必须保持为负值 ($I_L(t_0) < 0$)。这种负电流迫使存储在 L_s 中的能量释放 Q1 和 Q4 的输出电容，同时对 Q2 和 Q3 的输出电容充电，从而在 Q1 和 Q4 导通之前在二者之间产生必要的零电压条件。

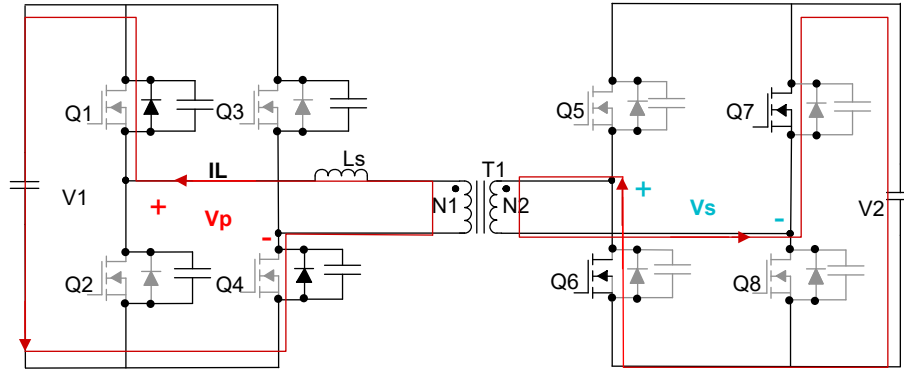


图 2-6. 间隔 1 期间的 DAB 转换器工作级

- 间隔 2 (t_0 至 t_1 - , 如图 2-7 所示) : 在 t_0 , 开关 Q1 和 Q4 在严格的零电压条件下导通 (理想情况) 。电感电流通过 Q1 和 Q4 的通道, 并开始线性上升。

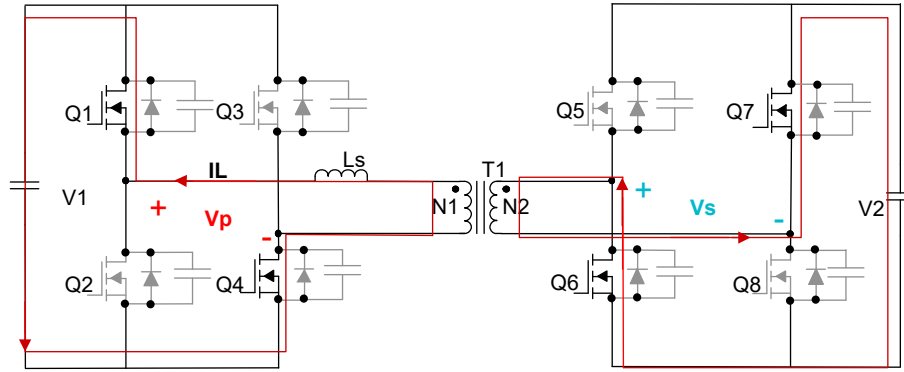


图 2-7. 间隔 2 期间的 DAB 转换器工作级

- 间隔 3 (t_1 至 t_2 - 电流反转, 如图 2-8 所示) : 在 t_1 , 电感电流过零并切换方向为正, 继续其线性进程, 该进程由变压器两端的电压差驱动。

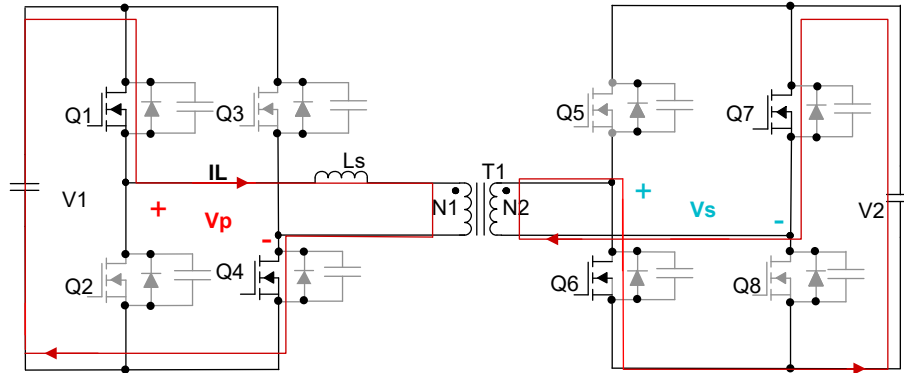


图 2-8. 间隔 3 期间的 DAB 转换器工作阶段

- 间隔 4 (t_2 至 t_2' - 次级侧 ZVS 实现, 如图 2-9 所示) : 在 t_2 , 次级侧开关 Q5 和 Q8 关闭。要为次级电桥启用 ZVS, 此时电感器电流必须为正 ($I_L(t_2) > 0$) 。该正变压器电流可成功使 Q5 和 Q8 的输出电容放电, 同时在次级侧死区时间内对 Q6 和 Q7 充电。

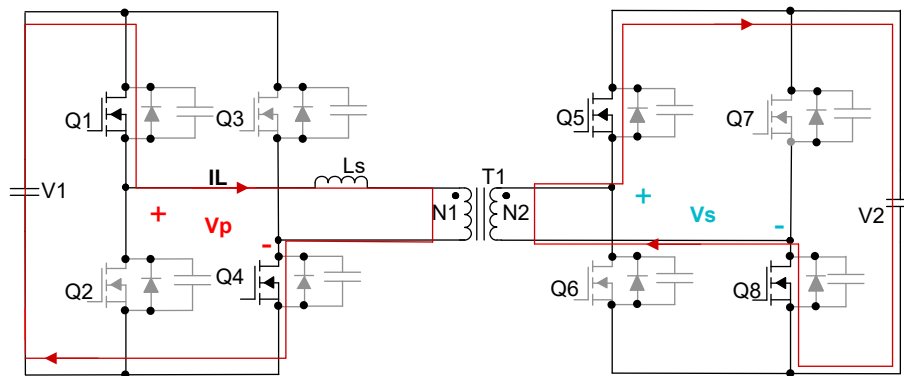


图 2-9. 间隔 4 期间的 DAB 转换器工作阶段

- 间隔 5 (t_2 至 t_3) - 完全换向，如图 2-9 所示：在 t_2 Q5 和 Q8 实现软导通。电流会自然地流经次级电桥通道，完成初级到次级电源换向阶段，直到下一个半个周期重复剩余 FET，其范围为 t_3 至 t_6 。

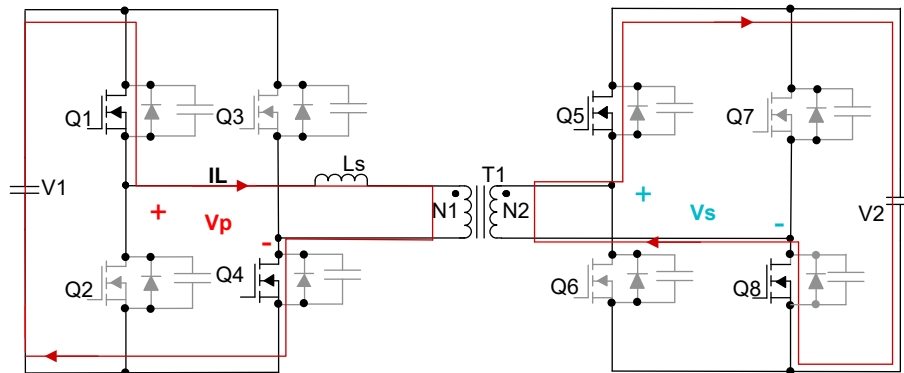


图 2-10. 间隔 5 期间的 DAB 转换器工作阶段

2.3 重点产品

2.3.1 TMS320F28P550SG

TMS320F28P55x (F28P55x) 是 C2000™ 实时微控制器系列中的一款器件，该系列为可扩展、超低延迟器件，旨在提高电力电子设备的效率，包括但不限于：高功率密度、高开关频率，并支持使用 GaN 和 SiC 技术。

实时控制子系统基于 TI 的 32 位 C28x DSP 内核，可针对从片上闪存或 SRAM 运行的浮点或定点代码提供 150MHz 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 能够将大量的常见任务从主 C28x CPU 上卸载。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，它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。

TinyEngine™ NPU (神经网络处理单元) 可以使用预先训练的模型支持机器学习推理。TinyEngine NPU 能够处理 600 - 1200MOPS (兆次运算/秒)，并且为电弧故障检测或电机故障检测提供模型支持，与仅基于软件的实现方案相比，将 NN 推理周期改进了高达 10 倍。利用 TI 的 Edge AI Studio - Model Composer 或 Tiny ML Modelmaker 加载与训练模型，以便获得高级功能集。C28x 的源代码由这些工具生成，无需手动编码。对于依赖自己的 AI 培训框架的客户，TI 的神经网络编译器可以帮助移植您的 AI 模型，使其与许多基于 C28x 的 MCU 兼容。对参考解决方案感兴趣的人员可以申请访问 TI 的电弧故障检测工程或电机轴承故障检测工程。

F28P55x 支持高达 1088KB 的闪存存储器，这些闪存存储器分为四个 256KB 存储体和一个 64KB 存储体，可支持对一个存储体编程的同时，在另一个存储体中执行。高达 133KB 的片上 SRAM 也可作为闪存存储器的补充。

F28P55x 上的实时固件更新硬件增强允许从旧固件到新固件的快速上下文切换，以尽可能减少更新器件固件时的应用停机时间。

高性能模拟模块集成在 F28P55x 实时微控制器 (MCU) 上, 并与处理单元和 PWM 单元紧密耦合, 以提供更好的实时信号链性能。24 个 PWM 通道均支持与频率无关的分辨率模式, 可控制从三相逆变器到功率因数校正和高级多级电源拓扑的各种功率级。

通过加入可配置逻辑块 (CLB), 用户可以添加自定义逻辑, 还可将类似 FPGA 的功能集成至 C2000 实时 MCU 中。

各种业界通用通信端口 (如 SPI、SCI、I2C、PMBus、LIN 和 CAN FD) 不仅支持连接, 还提供了多个引脚复用选项, 可实现出色的信号布局。

2.3.2 TMCS1126

TMCS1126 是一款电隔离霍尔效应电流传感器, 具有业界出色的隔离功能和精度。该器件还提供与输入电流成正比的输出电压, 且在所有灵敏度选项下均具有出色的线性度和低漂移。具有内置漂移补偿功能的精密信号调节电路能够在没有系统级校准的情况下, 在温度和寿命范围内实现小于 1.4% 的最大灵敏度误差, 或在一次性室温校准的情况下, 实现小于 0.9% 的最大灵敏度误差 (包括寿命和温度漂移)。

交流或直流输入电流流经内部导体, 所产生的磁场可由集成式片上霍尔效应传感器进行测量。无磁芯结构消除了对磁集中器的需求。差分霍尔传感器可抑制外部杂散磁场产生的干扰。低导体电阻将可测量电流范围提高至 $\pm 120\text{A}$, 同时更大程度地降低功率损耗并降低散热要求。绝缘能够承受 5kVRMS, 加上最小 8mm 的爬电距离和间隙, 可提供高电平可靠寿命增强型工作电压。

集成式屏蔽可提供出色的共模抑制和瞬态抗扰度。固定的灵敏度允许器件使用单个 3V 至 5.5V 的电源运行, 因此消除了比例式误差并提高了电源噪声抑制能力。TI 以更低的成本提供 B 级选项。

2.3.3 UCC23525

UCC23525 驱动器是适用于 IGBT、MOSFET 和 SiC MOSFET 的光兼容单通道隔离式栅极驱动器, 具有 5A 峰值输出拉电流和 5A 峰值输出灌电流以及 5kVRMS 增强型隔离额定值。由于具有 30V 的高电源电压范围, 因此允许使用双极电源来有效驱动 IGBT 和 SiC 功率 FET。UCC23525 可以驱动低侧和高侧功率 FET。与基于光耦合器的标准栅极驱动器相比, 此器件的主要特性可显著提高性能和可靠性, 同时在原理图和布局设计中保持引脚对引脚兼容性。

性能亮点包括高共模瞬态抗扰度 (CMTI)、低传播延迟和小脉宽失真。严格的过程控制可实现较小的器件间偏移。输入级是仿真二极管 (e-diode), 这意味着与光耦合器栅极驱动器中传统的 LED 相比, 可靠性和老化特性更为出色。UCC23525 采用扩展型 SO-6 封装, 支持 5kVRMS 增强型隔离额定值。扩展型 SO-6 封装具有大于 8.5mm 爬电距离和间隙, 来自材料组 I 的模压化合物的相对漏电起痕指数 (CTI) 大于 600V。

UCC23525 具有高性能和高可靠性, 使得该器件适合用于所有类型的电机驱动器、光伏逆变器、工业电源和电器。更高的工作温度为传统光耦合器以前无法支持的应用开辟了机会。

2.3.4 UCC27834

UCC278X4 是一款 230V 半桥栅极驱动器, 具有 3.5A 拉电流和 4A 灌电流, 专用于驱动功率 MOSFET。该器件包含一个接地基准通道 (LO) 和一个悬空通道 (HO), 专用于驱动采用自举电源供电和半桥配置的 MOSFET。该器件在两个通道间具有快速的传播延迟和出色的延迟匹配。UCC278X4 支持 8.5V 至 20V 的宽 VDD 工作电压范围, 可驱动更广泛的栅极电压, 并为低侧 (VDD) 和高侧 (HB) 偏置电源提供 UVLO 保护。UCC27834 提供了互锁功能选项, 可防止两个输出同时打开。

该器件具有稳健的驱动性能及出色的噪声和瞬态抗扰度, 具有高 dV/dt 耐受能力 (100V/ns), 而且开关节点 (HS) 具备宽负向瞬态安全工作区 (NTSOA)。UCC278X4 采用 SOIC-8 引脚封装, 额定工作温度范围为 -40°C 至 150°C 。

2.3.5 AMC03111R

AMC0x11R 是一款精密的电隔离放大器, 具有 2.25V 高阻抗输入和单端比例输出。高阻抗输入针对与高阻抗电阻分压器或具有高输出电阻的其他电压信号源的连接进行了优化。

隔离栅将在不同共模电压电平下运行的系统器件隔开。该隔离栅抗电磁干扰性能极强。该隔离栅经过认证, 可提供高达 5kVRMS 的增强型隔离 (DWV 封装) 和高达 3kVRMS 的基础型隔离 (D 封装) (60s)。

AMC0x11R 输出与输入电压成正比的单端信号。满标量程输出由施加到 REFIN 引脚的电压来设置。AMC0x11R 的输出设计为直接连接到 ADC 的输入端。将 REFIN 连接到与 ADC 相同的基准电压，以便匹配 ADC 的动态输入电压范围。

AMC0x11R 器件采用 8 引脚、宽体和窄体 SOIC 封装，额定温度范围为 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 系统设计原理

2.4.1 开关频率及变压器匝数比设计

图 2-11 展示了 TIDA-010990 的原理图。

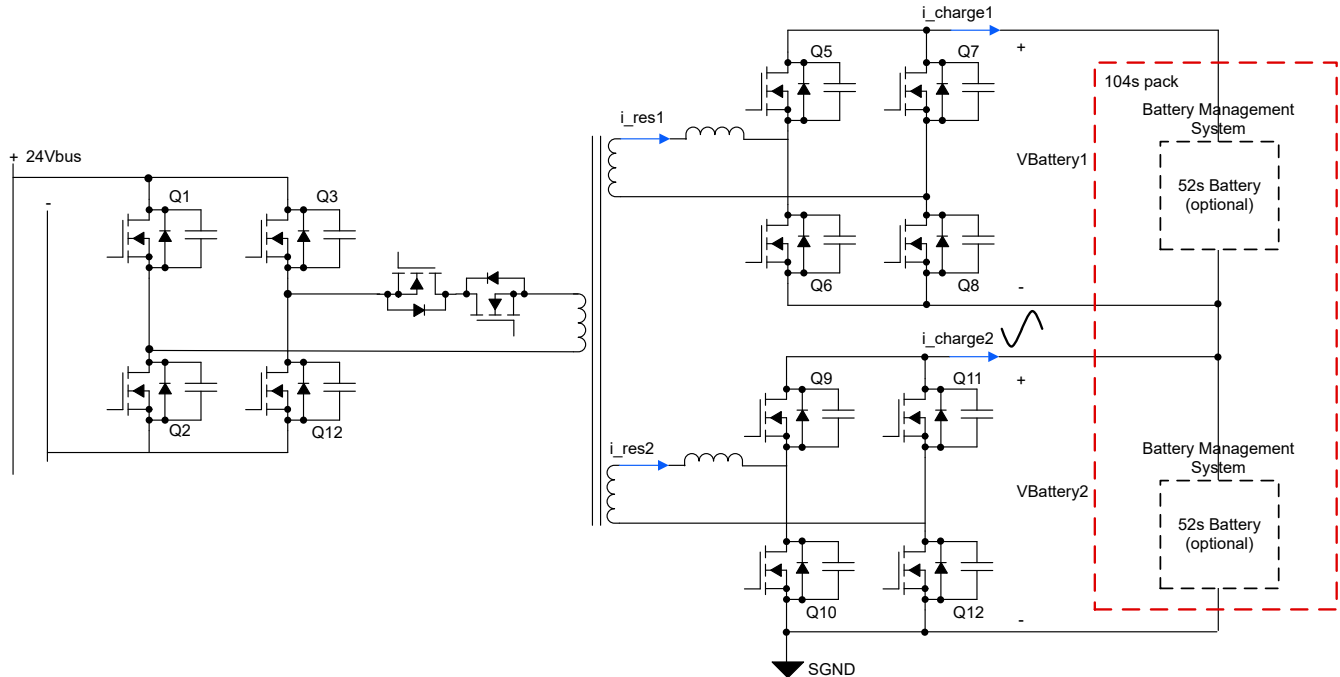


图 2-11. TIDA-010990 的原理图

开关频率 (f_s) 代表了目标 EIS 激励带宽与转换器热效率之间的关键权衡。为了支持 2kHz 的最大所需 EIS 激励频率以及足够的控制分辨率和低信号失真，开关频率必须明显高于激励频谱。

同时，为了尽可能地减少局部电池包级外壳中的开关损耗和磁芯损耗，选择 25kHz 作为最佳开关频率。

为了更大限度地减小无功功率并在标准主动平衡条件下实现优化的软开关 (ZVS) 性能，变压器匝数比应与端口之间的标称电压转换比保持一致。如原理图 (图 2-11) 所示，初级侧直流母线电压 V_{bus} 稳定在 24V，而每个次级侧端口连接至 52 芯电池包。假设锂离子电池的标称电压为 3.3V， $V_{battery1}$ 和 $V_{battery2}$ 的标称端口电压大约为 171.6V ($3.3V \times 52$)。因此，初级绕组 (N_1) 和两个相同的次级绕组 (N_2 、 N_3) 之间的变压器匝数比指定为：

$$N_1:N_2:N_3 = 1:7.15:7.15 \quad (3)$$

2.4.2 谐振电感设计

串联漏电感用作核心能量缓冲元件，用于控制 SPS 调制下的最大功率传输能力。此组件根据 EIS 诊断模式期间所需的极端工作条件进行了优化。

主开关 Q13 被禁用时，主端口完全隔离。该拓扑可用作对称的次级到次级 DAB 转换器，在绕组 N2 和绕组 N3 之间动态重排能量，以注入峰值振幅为 5A 的正弦电流。根据理想的 SPS 功率公式、标称电压 (171.6V) 和优化相移角 ($\phi = \pi/4$) 下需要的目标总环路电感约为 128 μH ：

$$L_{total_theoretical} = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot \phi(\pi - \phi)}{2\pi^2 \cdot f_s \cdot P_{max}} \quad (4)$$

为了在数学上满足此条件，同时确保对称的模块化硬件布局，该设计将环路电感分配到两个次级端口。部署了两个相同的外部谐振电感器 i_res1 和 i_res2 ，每个都选择标称值 **50 μH** 。这可提供大约 **100** 的总初始环路电感 μH （不包括变压器寄生泄漏），可围绕高效相移窗口精确定位 **45°** 标称控制轨迹。

2.4.3 直流阻断电容器设计

在 DAB 转换器中，由栅极驱动器传播延迟或元件不匹配引起的任何轻微的伏秒不对称都会向高频变压器注入直流偏置电流，从而导致灾难性的磁芯饱和。因此，必须将直流阻断电容器 C_b 与变压器绕组和谐振电感器（在高频交流侧）串联。

C_b 的选择严格取决于 **25kHz** 开关频率，并且必须满足以下两个硬件限制：

1. **阻抗优势预防**：为了确保功率传输能力仍保持由谐振电感器 ($L_{total} = 100 \mu\text{H}$) 严格控制，阻断电容器在开关频率下的阻抗 ($f_s = 25 \text{ kHz}$) 必须明显小于电感器（通常小于 10%）。这可确保 C_b 不会干扰标准 SPS 功率公式：

$$X_{Cb} = \frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot C_b} \leq 10\% \cdot (2\pi \cdot f_s \cdot L_{total}) \quad (5)$$

2. **谐振频率放置**：由 C_b 和 L_{total} 形成的意外串联谐振频率 (f_r) 必须安全地置于开关频率以下，以避免严重的电压过冲并控制不稳定性：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{total} \cdot C_b}} \ll f_s \quad (6)$$

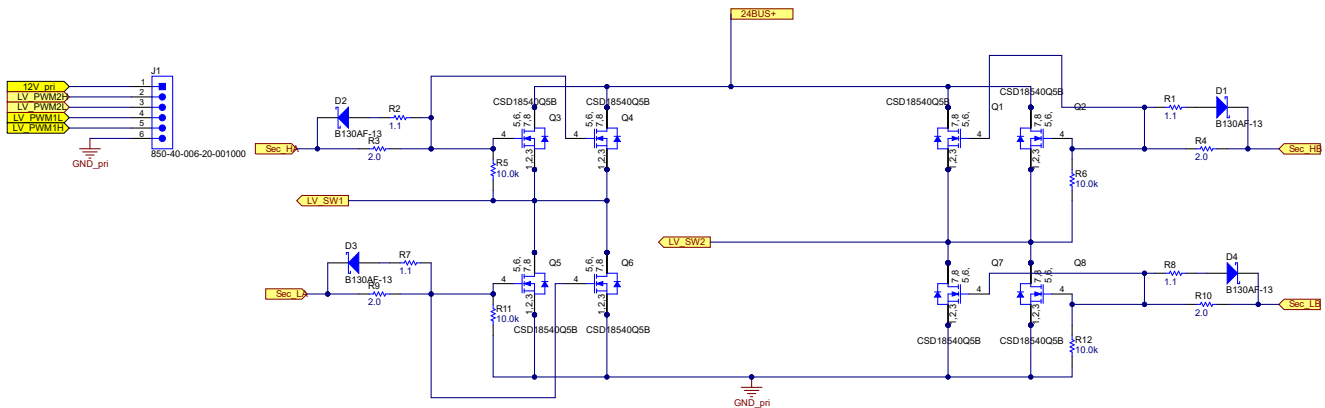
根据 **25kHz** 工作频率和 **100 μH** 环路电感的这些条件，计算得出 C_b 的最佳电容处于**范围 2 μF 至 5 μF** ，选择 **10 μF** 。必须选择具有较高交流 RMS 电流额定值的高频、低 ESR **聚丙烯薄膜电容器**或**多层陶瓷电容器 (MLCC)**，以承受持续的高频开关应力而不会出现热降级。

2.4.4 硬件设计原理

本部分讨论与硬件相关的选择以及 PCB 原理图设计等。

2.4.4.1 功率级

图 2-12 示出了双向隔离多端口 DAB 转换器的功率级。初级侧包含一个 **60V**、**2.2m Ω** 、N 沟道、功率 MOSFET **CSD18540Q5B**，可阻断 **24V** 的直流电压，次级侧包含一个 **400V**、**25.4m Ω** 、SiC **IMBG40R025M2H**，可阻断 **200V** 的直流电压。



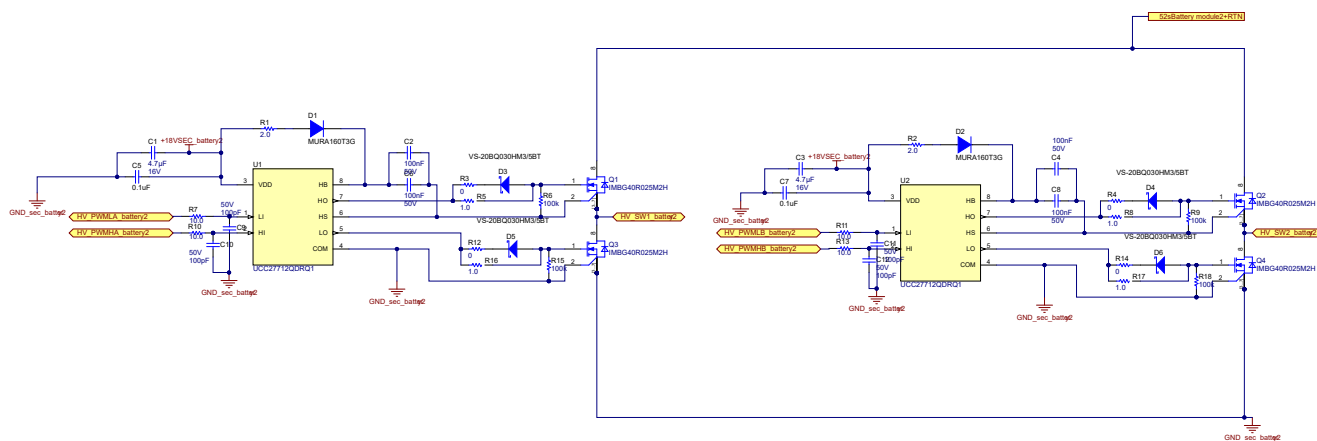


图 2-12. 功率级

2.4.4.2 检测

此设计需要检测输入电压，以在反向模式下执行恒压环路。需要对初级直流电压进行检测。

图 2-13 显示了初级电压检测电路要检测的最大初级总线电压为 30V，并且 MCU 置于次级侧。因此，应选择 AMC0311R 来检测初级侧直流电压。

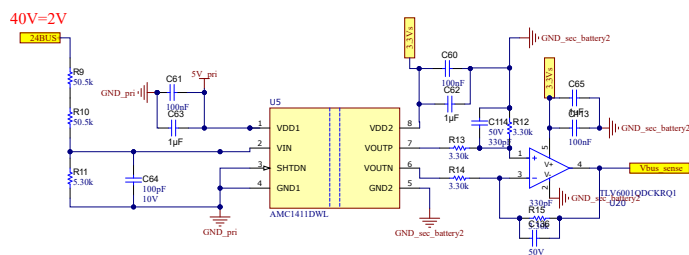


图 2-13. 初级电压检测电路

图 2-13 显示了次级电压检测电路。待检测的最大次级电池电压为 200V。

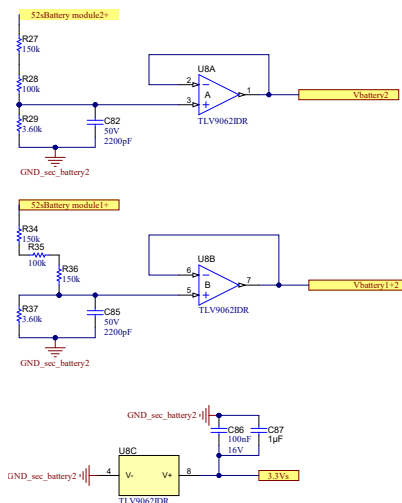
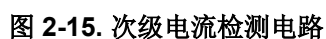


图 2-14. 次级电压检测电路

这种设计需要在 EIS 模式下检测输入电压以执行电流回路。需要检测次级电流。图 2-14 显示了次级电流检测。选择 TMCS1126B4 以检测高达 10A 的输出电流。图 2-15 还显示了用于保护的谐振回路电流，也选择 TMCS1126B4。



3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

本参考设计需要以下硬件：

- 一块 TIDA-010990 电源板
- 一张 TMDSCNCD28P55 控制卡
- USB Type-C® 电缆
- 笔记本电脑

对 DUT 供电和进行评估需要以下测试设备：

- 能够在所需电流下提供 0V – 200V 之间的电压的双向直流电源
- 功率分析仪
- 辅助电源
- 示波器
- 隔离式电压探针和电流探针

3.2 测试设置

如需测试本参考设计的效率，请使用图 3-1 所示的设置。

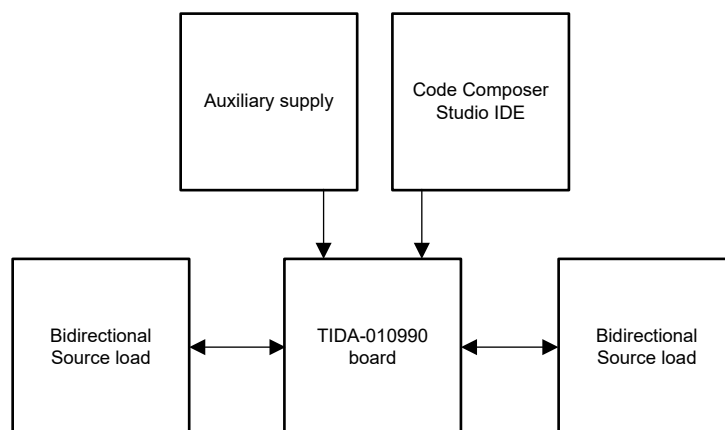


图 3-1. 测试设置

- 作为双向转换器，输入和输出都需要连接到双向源极负载，其中双向源极和负载需要支持 200V 5A。
- 为 18V、1A 提供一个通道的辅助电源。
- 一张 TMDSCNCD28P55 控制卡
- 功率分析仪
- 带有隔离式探针的示波器，用于测量电压和电流

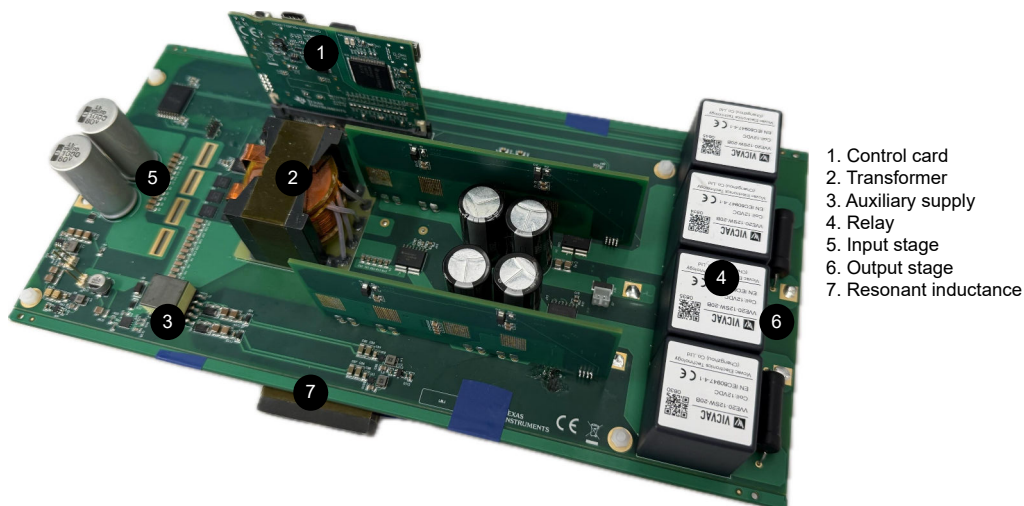


图 3-2. TIDA-010990 电路板

3.3 测试结果

下面的显示了 1Hz、50Hz、500Hz、1000Hz、1600Hz 和 2000Hz EIS 激励电流。红色表示 EIS 激励电流、绿色表示谐振电流。

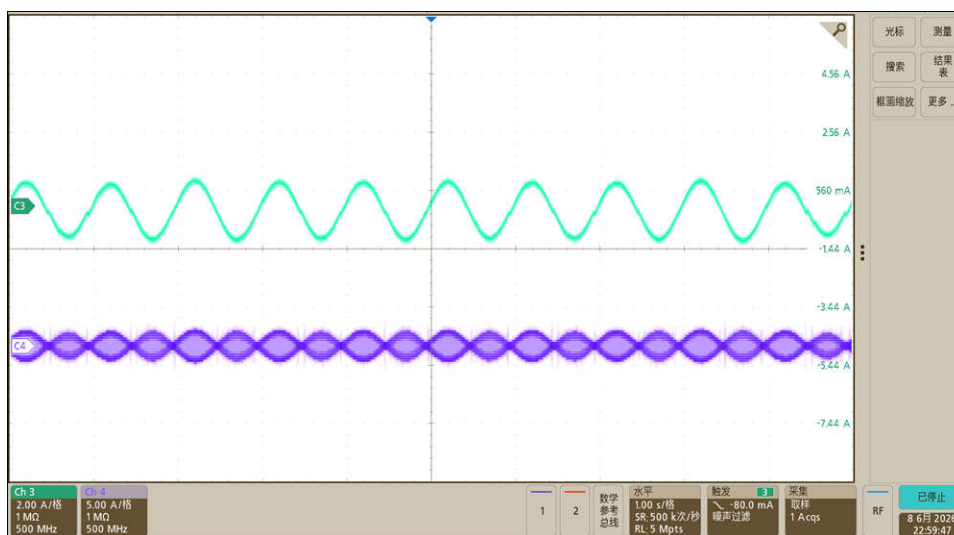


图 3-3. 1Hz 测试波形

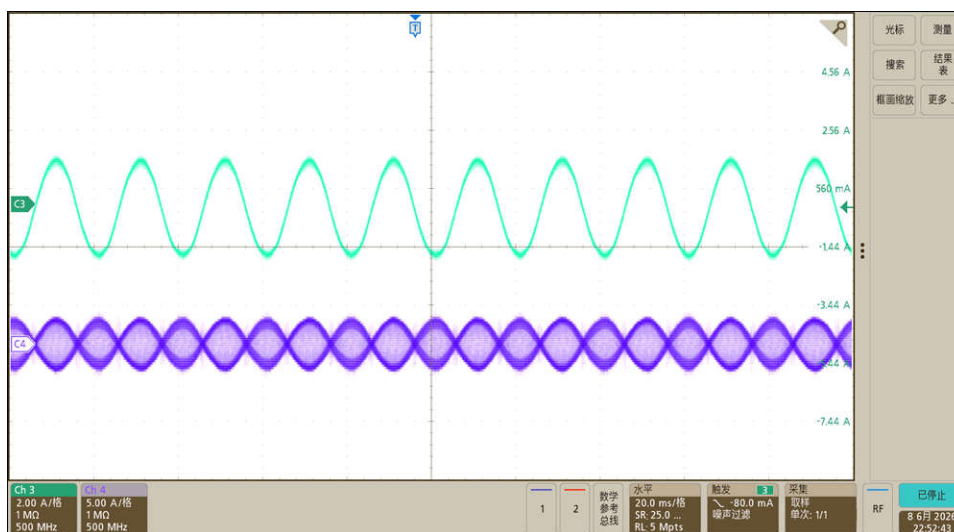


图 3-4. 50Hz 测试波形

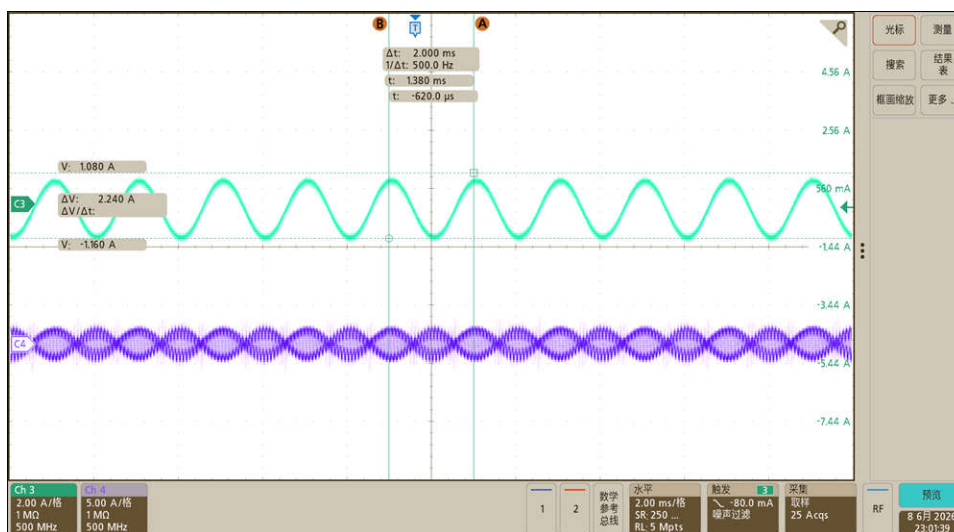


图 3-5. 500Hz 测试波形

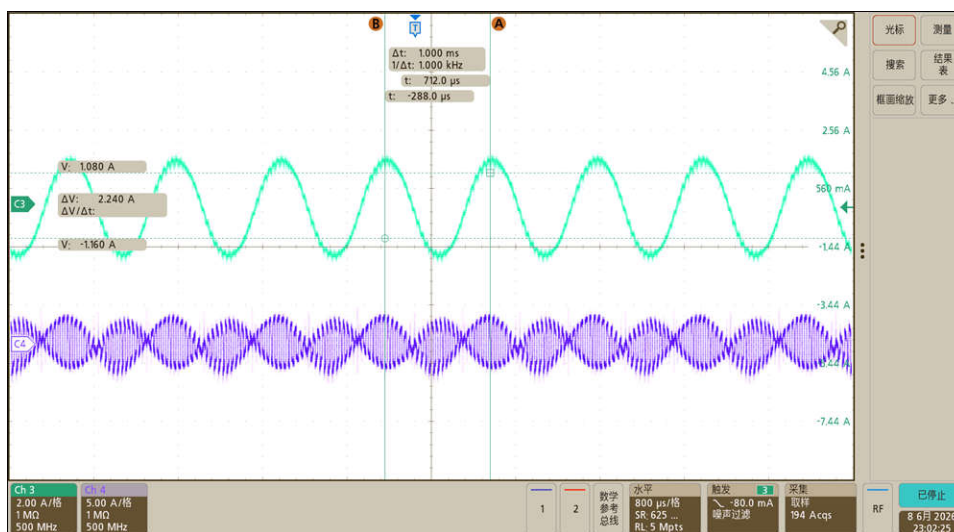


图 3-6. 1000Hz 测试波形

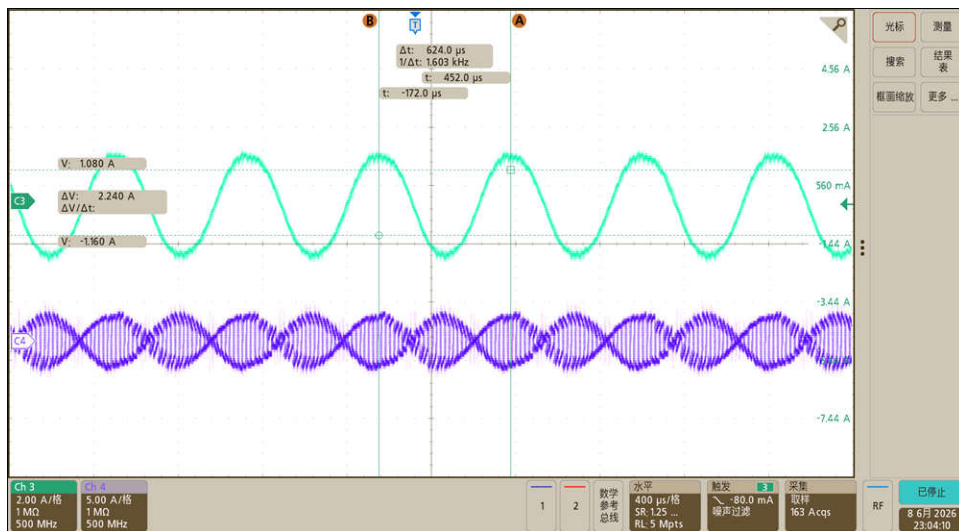


图 3-7. 1600Hz 测试波形

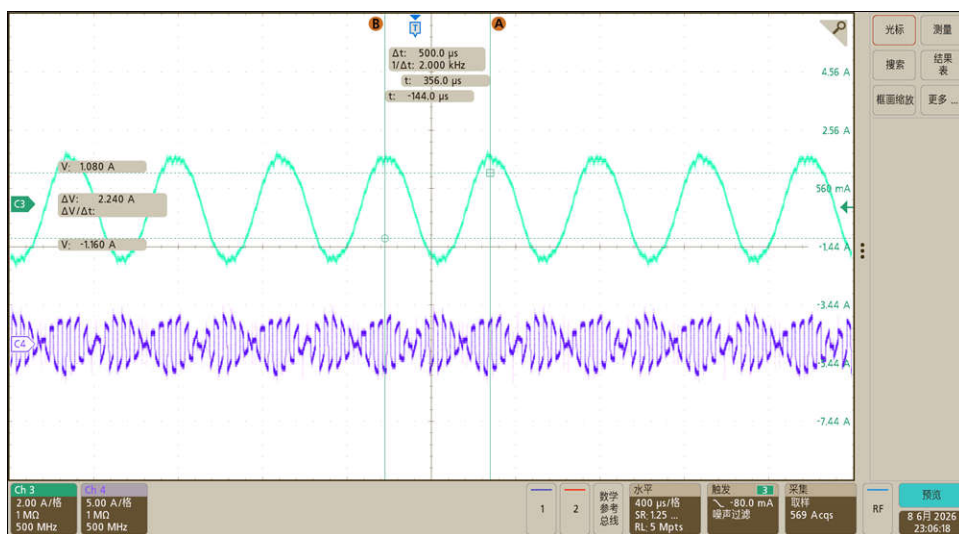


图 3-8. 2000Hz 测试波形

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-010990](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010990](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

C2000Ware C2000Ware 是一套全面的软件和文档集，旨在最大限度地缩短开发时间。C2000Ware 包括特定于器件的驱动程序、库和外设示例。

软件

[简短说明](#)

[说明](#)

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[TMS320F28P55x 实时微控制器](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[UCC23525 5A 拉电流、5A 灌电流、5kVRMS 增强光兼容单通道隔离式栅极驱动器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI)，[UCC278X4 高速 230V 半桥驱动器，具备 3.5A 或 4A 驱动强度，以及最高 100V/ns 的防噪性能](#) 数据表
4. 德州仪器 (TI)，[双有源电桥拓扑概述](#) 电源设计研讨会

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 TinyEngine™ are trademarks of Texas Instruments.

Type-C® is a registered trademark of USB Implementers Forum.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

WILL TAI 目前担任系统工程师，专注于电网基础设施中的储能系统，负责功率转换系统、电芯均衡和电池包均衡设计。在加入 TI 之前，他获得了南京航空航天大学电气工程硕士学位。

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