

## Technical Article

## 使用数字控制器在次级侧实现 LLC 电流模式控制



Desheng Guo

## 电流模式控制 LLC 注意事项

如图 1 所示，指示器 - 指示器 - 电容器 (LLC) 串行谐振电路可以在初级侧实现零电压开关，在次级侧实现零电流开关，从而提高效率并实现更高的开关频率。通常，LLC 转换器采用直接频率控制模式，只有一个电压环路，可通过调整开关频率来稳定其输出电压。直接频率控制 LLC 无法实现高带宽，因为 LLC 微小信号传输功能存在双极点，在不同的负载条件下会发生变化 [1] [2]。当将所有边界条件纳入考虑时，用于直接频率控制的 LLC 补偿器设计将变得棘手且复杂。

电流模式控制可以通过内部控制环路消除双极点，同时使用简单的补偿器在所有运行条件下实现高带宽。混合滞环控制是一种 LLC 电流模式控制方法，它结合了电荷控制和斜率补偿技术 [3]。这种控制方法在保留电荷控制优异瞬态性能的同时，通过引入斜率补偿技术，有效规避了空载或轻载状况下的相关稳定性问题。德州仪器 (TI) 提供的 UCC256404 LLC 谐振控制器证明了该方法切实可行。

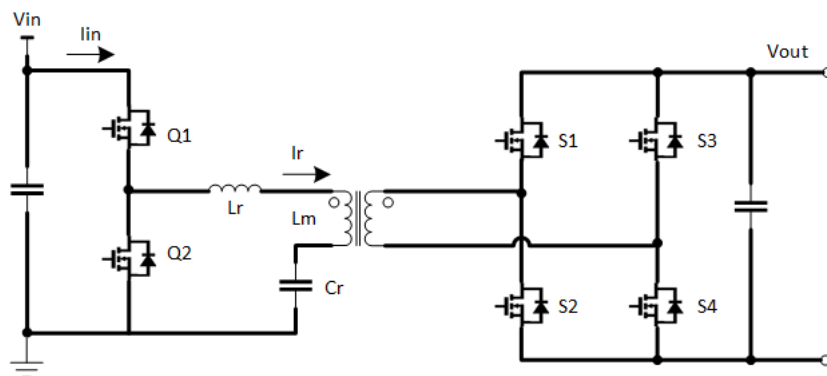


图 1. LLC 串行谐振电路可在初级侧实现零电压开关，并在次级侧实现零电流开关。来源：德州仪器 (TI)

## LLC 电流模式控制的原理

与降压和升压等脉宽调制 (PWM) 转换器类似，峰值电流模式控制可在每个开关周期内直接调控电感电流，从而将内环控制系统简化为一阶系统。参考 [2] 提出了采用谐振电容器电压的 LLC 电荷控制方案。

在 LLC 转换器中，谐振回路的工作方式类似于摆动。高低侧开关对谐振电容器电压进行推挽操作：当高侧开关导通，且谐振电流转为正值后，谐振电容电压将向上摆动；反之，当低侧开关导通，且谐振电流转为负值后，谐振电容电压将向下摆动。

当高侧开关导通时，能量流入谐振转换器。如果移除输入去耦电容器，则向谐振回路提供的功率等于输入电压和输入电流的乘积的积分值。若忽略死区时间，则公式 1 可表示每个开关周期内的能量。

$$E_{pos} = \int V_{in} \times i_{in}(t) dt \quad (1)$$

在公式 1 中，输入电压是恒定的，输入电流等于谐振电流的绝对值。因此您可以将公式 1 修改为公式 2。

$$E_{pos} = V_{in} \times \int |i_r(t)| dt \quad (2)$$

观察谐振电容器，谐振电流的积分值与谐振电容器上的电压变化成正比 (公式 3)。

$$\int i_r(t)dt = C_{CR} \times \Delta V_{CR} \quad (3)$$

公式 4 可推导出传输到谐振回路的能量。

$$E_{pos} = V_{in} \times C_{CR} \times \Delta V_{CR} \quad (4)$$

从公式 4 可以明显看出，每个开关周期内传递的能量与高侧开关导通时谐振电容的电压变化量成正比。这与降压或升压转换器中的峰值电流控制非常相似，其中能量与指示器的峰值电流成正比。

LLC 电流模式控制通过控制谐振电容器上的电压变化来控制每个开关周期中提供的能量，如 图 2 所示。

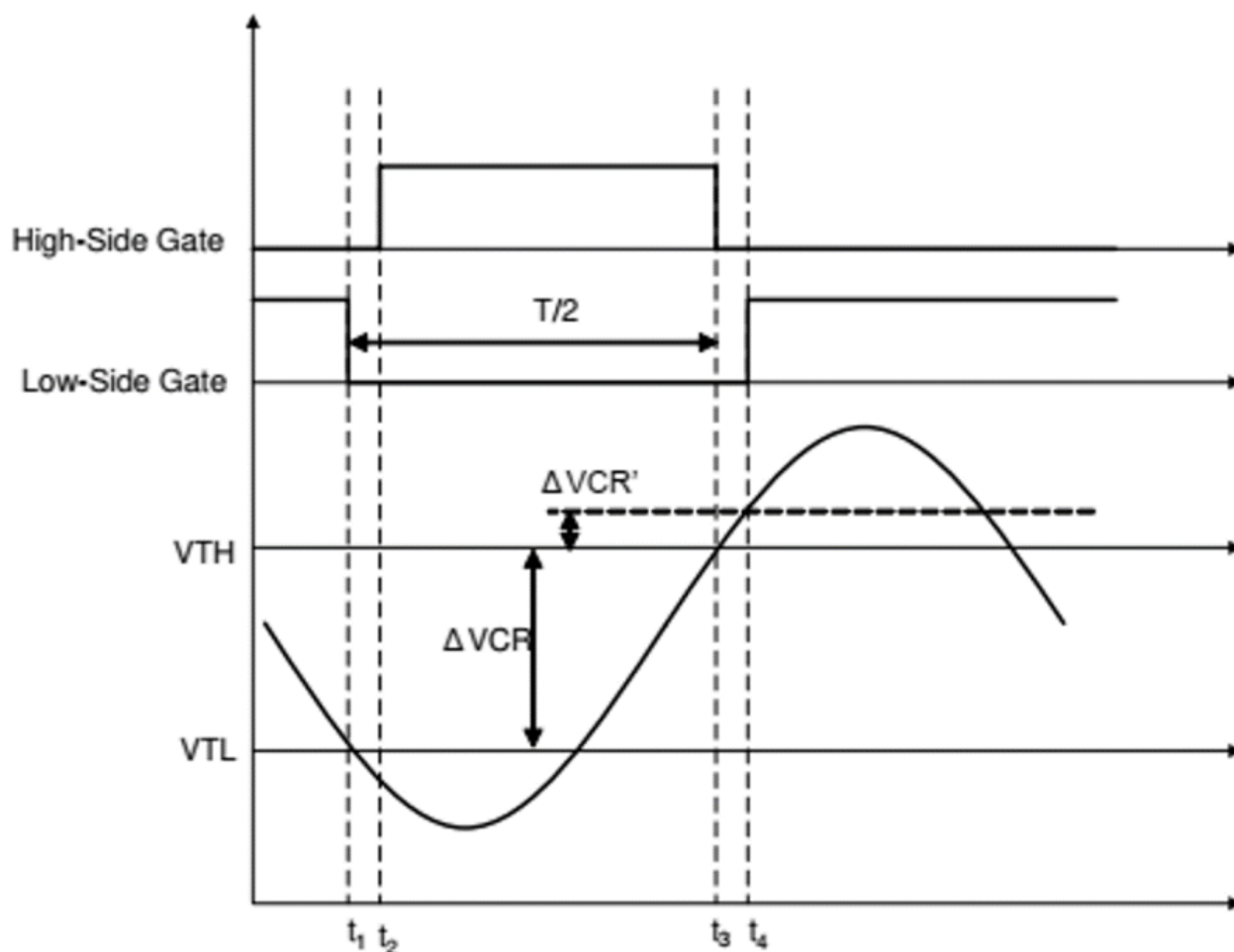


图 2. 这种通过控制谐振电容器电压变化来管理每个开关周期传输能量的方式，正是 LLC 电流模式控制的原理。  
来源：德州仪器 (TI)

### 使用 MCU 实现 LLC 电流模式控制

图 3 展示了基于德州仪器 (TI) TMS320F280039C C2000™ 32 位微控制器 (MCU) 实现的电流模式 LLC 逻辑，该方案包含基于硬件的谐振电容器电压变化量 ( $\Delta V_{CR}$ ) 比较、脉冲生成和最大周期限制 [4]。

在 LLC 电流模式控制中，信号  $V_c$  来自电压循环补偿器，信号  $V_{CR}$  是谐振电容器的电压感应。C2000 比较器子系统模块具有内部斜率发生器，该发生器可自动为  $V_c$  提供下降斜率补偿。您只需设置斜率发生器的初始值；模数转换器 (DAC) 将根据斜率设置提供下降斜率  $V_{CR}$  限制 ( $V_{c\_ramp}$ )。比较器子系统模块将  $V_{CR}$  的模拟信号与斜率限制进行比较，并生成触发事件 (COMPARE\_EVT) 以通过 ePWM X-Bar 触发增强型 PWM (ePWM)。

ePWM 中的动作限定器子模块接收来自比较器子系统的比较事件，并在每个开关周期中将 PWM (PWMH) 的高侧拉低。在 PWMH 变为低电平后，可配置逻辑块会将相同的脉冲宽度复制到 PWM (PWML) 的低侧。PWML 变为低电平后，可配置逻辑块 (CLB) 将生成同步脉冲，用于复位所有相关模块并将 PWMH 信号重新置于高电平。该过程会按照新的开关周期重复。

除了比较动作之外，时间基值子模块还限制了 PWMH 和 PWML 的最大脉冲宽度，这两个脉冲宽度决定了 LLC 转换器的最小开关频率。如果计时器计数至最大值时仍未出现比较事件，时间基值子模块将复位 AQ 子模块并拉低 PWMH，以此替代比较器子系统模块的比较事件动作。

这个硬件逻辑构成内部 VCR 变化控制，该硬件逻辑可控制在每个开关周期中传送到谐振回路的能量。随后，可采用传统中断服务例程设计外部电压循环补偿器，通过计算并刷新 VCR 变化振幅至  $V_c$  的设定值来实现控制。

有关混合滞环控制逻辑的更详细说明，请参阅参考资料 [1]。

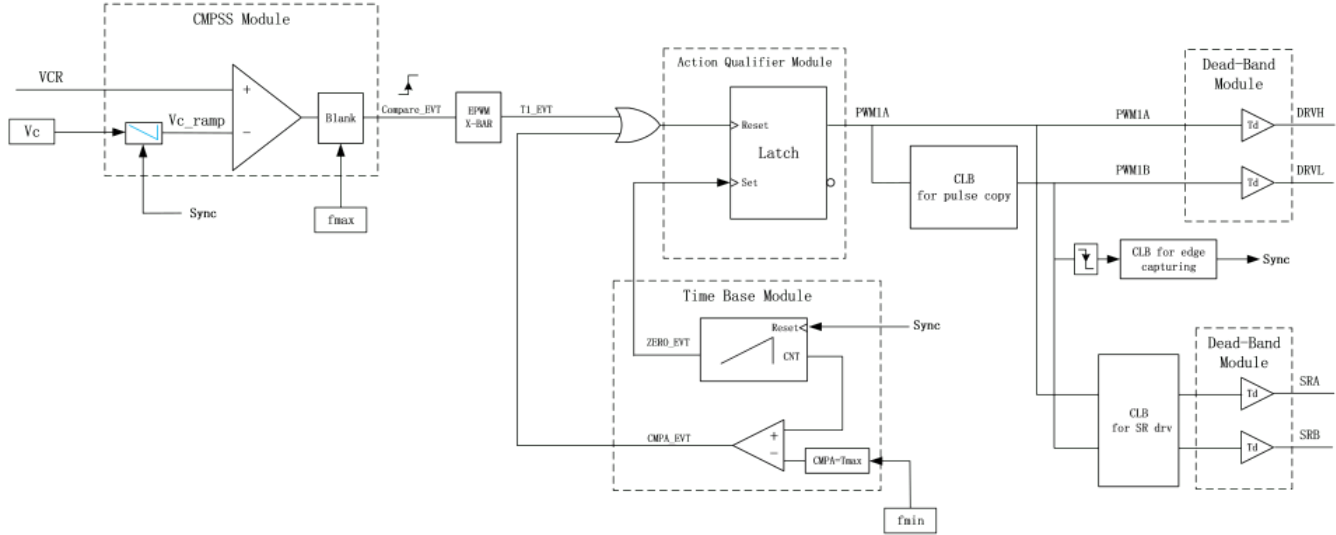


图 3. 采用 C2000 MCU 的 LLC 电流模式控制逻辑，其中信号  $V_c$  来自电压循环补偿器，信号  $V_{CR}$  是谐振电容器的电压感应。来源：德州仪器 (TI)

### 实验结果

我在使用 TMS320F280039C MCU 的 1kW 半桥 LLC 平台上测试了此处所述的电流模式控制方法。图 4 显示了 400V 输入和 42A 负载下的电压循环波德图，证明 LLC 可以实现 6kHz 带宽和 50 度的相位裕度。

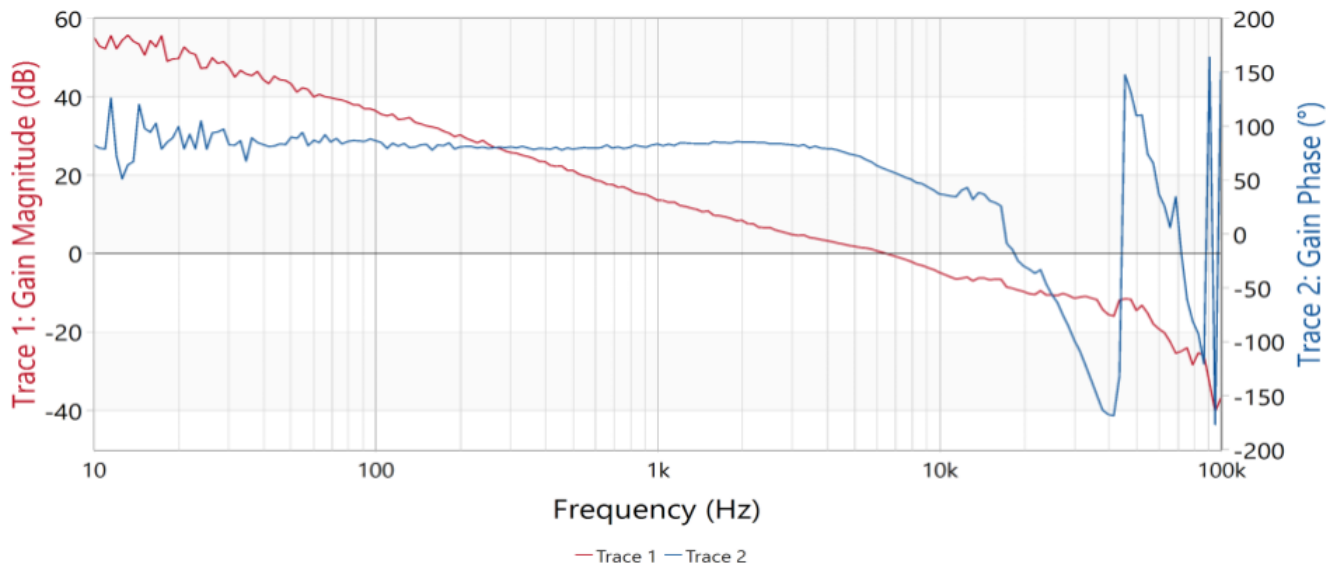
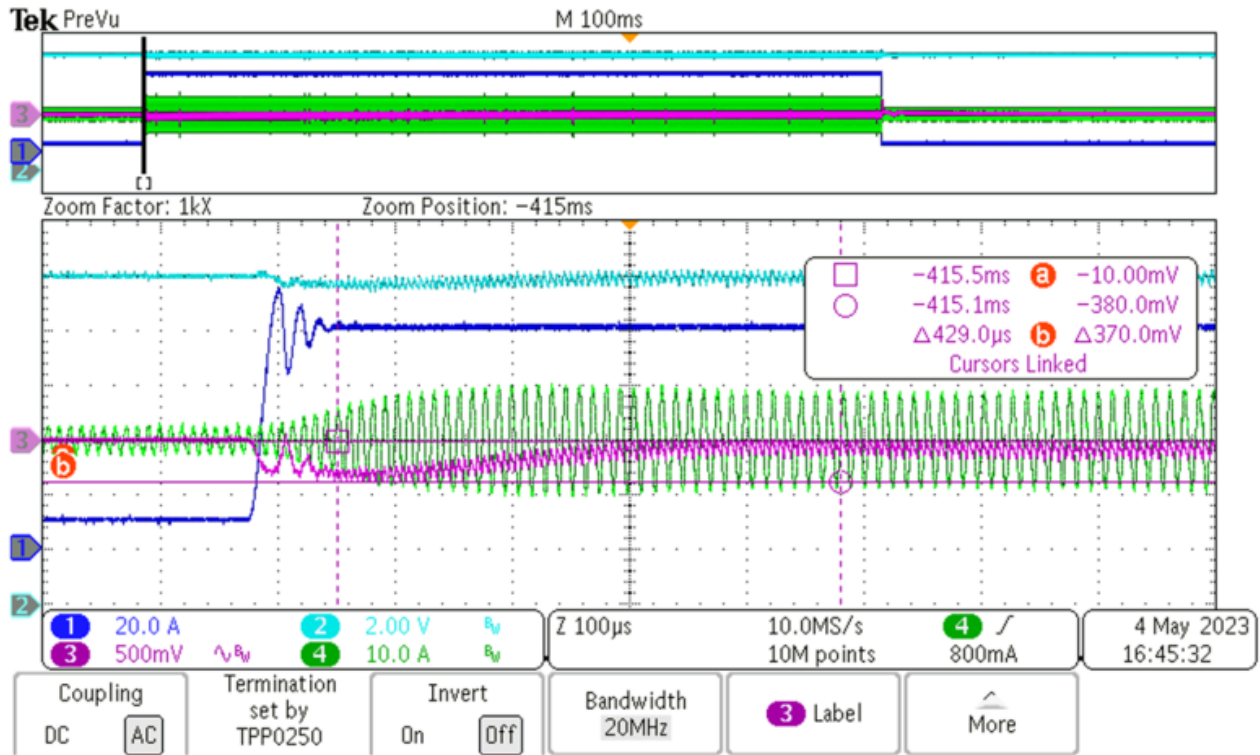


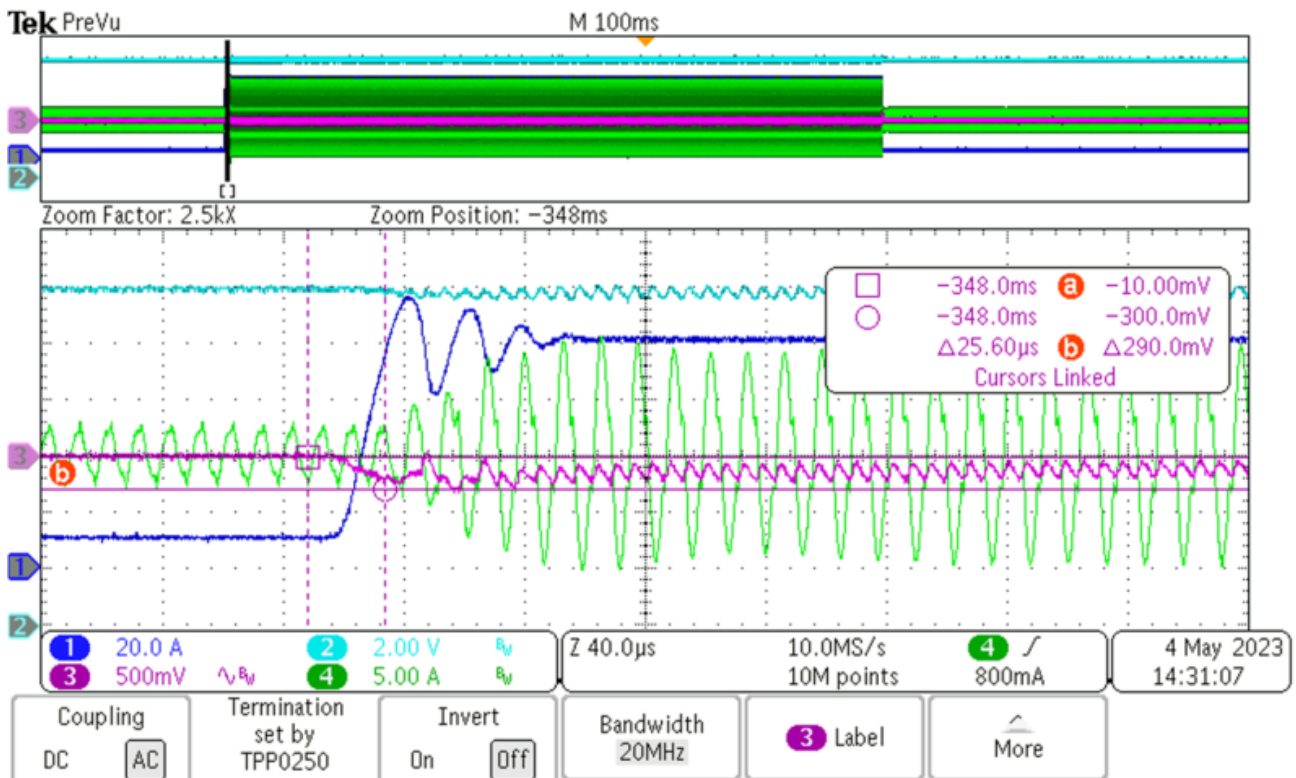
图 4. 具有 400V 输入和 42A 负载的电流模式控制 LLC 的波德图。来源：德州仪器 (TI)

图 5 比较了对输入电压 400V，负载电流 10A 至 80A (转换速率为  $2.5\text{A}/\mu\text{s}$ ) 的瞬态状况下，直接频率控制与混合滞环控制的负载瞬态特性。如您所见，与传统的直接频率控制 LLC 相比，混合滞环控制电流模式控制方法可以更好地响应负载瞬态。

有关更多实验测试数据和波形，请参阅参考资料 [5]。



(a)



(b)

图 5. 直接频率控制 (a) 与混合滞环控制 (b) 在  $400V_{DC}$  输入，电流  $10A$  至  $80A$  (转换率  $2.5A/\mu s$ ) 情况下的负载瞬态。绿色是主要电流；浅蓝色是 DC 耦合的输出电压；紫色是 AC 耦合的输出电压；深蓝色是输出电流。来源：德州仪器 (TI)

## 数字电流模式控制 LLC

较之直接频率控制，数字电流模式控制的 LLC 可实现更高控制带宽，并在负载切换期间保持极低的电压波动。在 N+1 冗余和并联应用中，这种控制方法可以在热插拔或提供保护期间将总线电压保持在稳压范围内。因此，这种控制方法凭借其快速响应特性和数字可编程能力，已在数据中心电源和 AI 服务器电源领域获得广泛应用。

### 相关内容

- [电源技巧 84](#)：跳出 LLC 系列谐振转换器常规思维的限制
- [电源技巧 117](#)：在完全工作条件下进行测试之前测量 LLC 谐振回路
- [电源技巧 122](#)：1kW 高密度 LLC 电源模块中使用的平面变压器概述
- [电源技巧 97](#)：构造 LLC-SRC 增益曲线以满足电池充电器需求
- [电源技巧 92](#)：高频谐振转换器设计注意事项第 2 部分

### 参考资料

1. Hu、Zhiyuan、Yan-Fei Liu 和 Paresh C. Sen. “[Bang-Bang LLC 谐振转换器充电控制](#)”。发表于 IEEE 电力电子学汇刊第 30 卷第 2 期 (2015 年 2 月)：第 1093-1108 页。doi: 10.1109/TPEL.2014.2313130.
2. McDonald、Brent 和 Yalong Li. “[一款具有业界领先瞬态性能和低待机功耗的新型 LLC 谐振控制器](#)”。发表于 2018 年 IEEE 应用电力电子会议暨博览会 (APEC)，2018 年 3 月 4 日至 8 日，第 489-493 页。doi: 10.1109/APEC.2018.8341056.
3. “[具有超低可闻噪声和待机功耗的 UCC25640x LLC 谐振控制器](#)”。德州仪器 (TI) 数据表，文献编号 SLUSD90E，2021 年 2 月。
4. Li、Aki、Desheng Guo、Peter Luong 和 Chen Jiang. “[混合滞环控制 LLC 转换器的数字控制实现](#)”。德州仪器 (TI) 应用手册，文献编号 SPRADJ1A，2024 年 8 月。
5. 德州仪器 (TI) (日期不详) “[使用 C2000™ 实时微控制器的 1kW、12V HHC LLC 参考设计](#)”。德州仪器 (TI) 参考设计编号 PMP41081。访问日期：2025 年 1 月 16 日。

先前发布于 EDN.com 上。

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 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、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。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  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司