

## Application Brief

# 电池充电应用中的 LLC 谐振控制器：在宽输入电压范围内实现高效率



Gowthamraja RM

随着充电技术（包括电动工具、车载充电器和工业充电器）取得诸多进展，设计变得越来越紧凑，在所有负载水平下都能提供高功率密度和一致的效率。这些设计还可在严苛的环境中提供稳健的性能，并且可承受较大的温度波动和长时间的使用。

半桥 LLC 拓扑是在 <1.3kW 功率范围内充电设计的实用时适用。除了这种功率级别，设计人员通常转向全桥 LLC 和相移全桥 (PSFB) 拓扑，以尽可能减少传导损耗并提高效率。UCC25661x 是 TI 的新款 LLC 控制器，与前代产品和传统 PWM 控制器相比，它可提供更好的稳压和集成保护。

UCC25661x 是 TI 全新的分立式 LLC 控制器，具有控制器高达 750kHz 谐振能力等功能，可实现小外形尺寸和高功率密度。在低负载下实施两种突发模式可实现高待机效率并消除可闻噪声。输入功率比例控制 (IPPC) 机制在充电应用中使用，对器件有很大影响。与充电控制或混合迟滞控制等传统控制机制不同，IPPC 可在 LLC 转换器设计中实现更好的宽输入电压 (Vin) 和宽输出电压 (Vout) 运行。简言之，该控制器稳压调控时采样输入功率，而非输入电流或工作频率，因此可实现极宽的 Vin/Vout 范围。下文将进一步阐述这些优势。

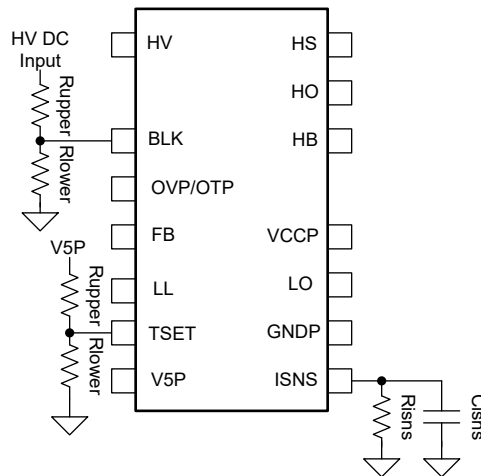


图 1. IPPC 引脚特定连接

UCC25661x 中的 IPPC 辅助功能使该器件非常适合电池充电应用。以下引脚与 IPPC 关联：

1. FB 引脚：FBReplica 取决于 FB 引脚中提供的电流，从而实现宽 Vout。
2. ISNS 引脚：该引脚用于为直接连接到谐振回路的电路提供逐周期 OCP 保护。该引脚使用电压系数电阻 (VCR) 合成器生成内部谐振电容器电压。
3. BLK 引脚：该引脚用于确定控制器的增益。该引脚还用作输入过压/欠压 (BI/BO) 阈值设置，用于打开和关闭控制器。
4. TSET 引脚：该引脚用于设置控制器的最小运行频率并设置控制器的积分器时间常数。不同的 TSET 选项会设置不同的最小频率。

**表 1. IPPC 在电池充电应用中的优势**

特性	系统优势	系统影响
内部 VCR 合成器	通过向 ISNS 引脚感应的信号添加具有前馈增益的补偿斜坡,可在内部对 VCR 信号进行合成。此处省去了外部 VCR 计时电容器。	通过减少两个 VCR 电容器来降低系统级设计的 BoM
支持宽输入电压范围	由于此处反馈信号与输出功率成正比,因此该反馈信号受输入电压、开关频率波动的影响更小。	在整个输入电压范围内保持高效率,同时保持低纹波
无硬开关	$V_{TL}$ 和 $V_{TH}$ FET 关断时间(自适应死区时间)由 FB 引脚上的上一个周期输出决定,以防止硬开关。	全负载区间效率较高,散热表现良好
OLP 触发点变化非常小	OLP 触发点在输出电压变化时几乎保持恒定,同时保持恒定的功率电平	增强的保护特性可防止功率急剧增加
防止不必要的突发模式运行	即使电池电压较低,控制器也不会由于 IPPC 而进入故障突发模式。IPPC 消除了开关频率对控制电压的影响,因此电池电压不会决定控制器的工作频率,反之亦然。	缩短电池充电时间并提高效率
预偏置启动	当电池在启动时已经有负载时,无需外部电路来保护控制器或电池。通常,当启动过程中已经存在一些负载时,交流/直流 PSU 会进入硬开关模式,损耗很高。UCC25661x 可防止这种模式开关和损耗。	无硬开关且损耗超低

通常,电池充电客户在闭环直流/直流拓扑中实现具有反馈功能的恒流恒压(CC-CV)环路。此实现方案可为多个电芯组合(例如6节和12节串联电池包)提供高效率、安全性和电芯均衡。系统根据电池负载电阻在CC模式或CV模式下运行。

1. CC 模式:在 CC 运行模式下,电池电压从较低的值逐渐增加到所需的最大电压值。电池充电电流值是恒定的。
2. CV 模式:在 CV 运行模式下,电池电压在所需值中保持恒定,而电流大幅下降到接近零值。因此,充电功率也会降低到较低的值。
3. 涓流充电:为了防止电池自行耗尽,系统会在小突发充电包中提供大约 0A 的电流。当系统检测到负载电阻小幅下降时,就会出现这种现象。

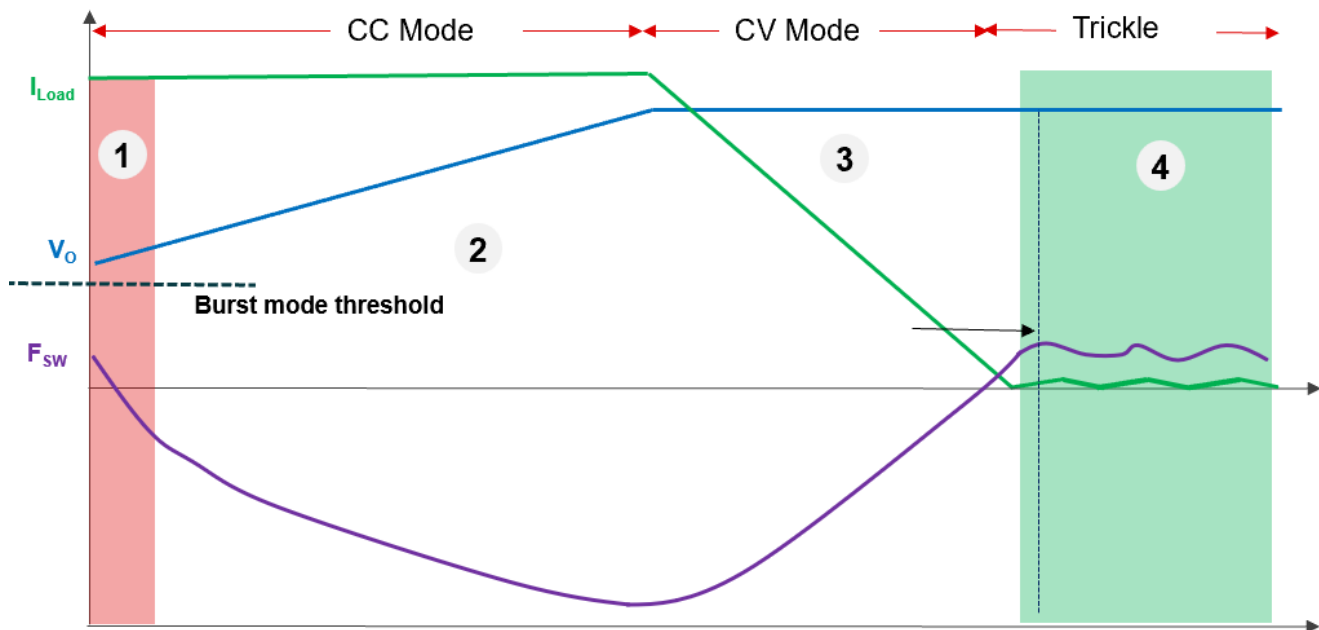

**图 2. CC-CV 环路设置中的不同工作区域**

图 2 显示了  $V_o$ 、负载电流和开关频率在不同工作模式下的变化：

1. 区域 1：电池电压非常低。传统的 LLC 控制在突发模式下运行，但 IPPC 会防止控制器进入不必要的突发模式运行。在此区域内，开关频率也很高。
2. 区域 2：提供峰值电流，直到电池电压达到所需值。在恒流模式下，产生的功率也很高，开关频率逐渐降低。如果此处的电池电压非常低，例如当刚刚退出区域 1 时，基于 LLC 控制器的传统设计仍会在突发模式下运行，从而在电池充电电流中引入巨大的纹波和 unnecessary 的可闻噪声。
3. 区域 3：在此期间，电流逐渐减小到接近零的值。提供的功率也会逐渐降低，因此在恒压模式下，开关频率会增加。
4. 区域 4：存在涓流充电，以使电池保持完全充电模式。控制器会产生小批量充电，以避免电池放电。

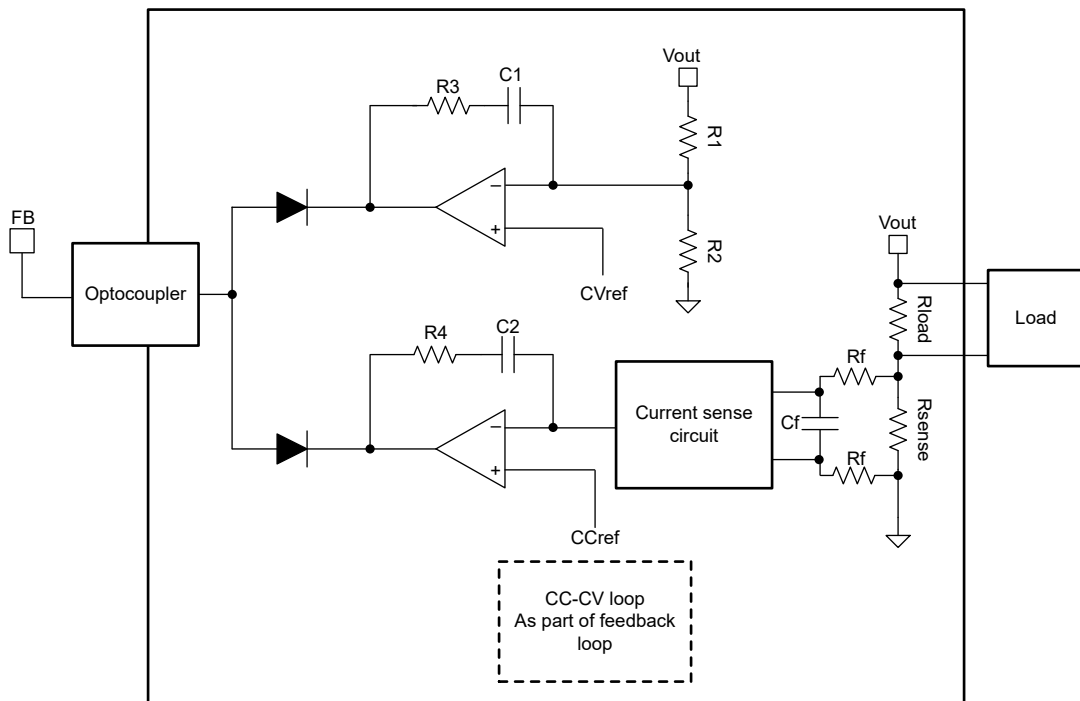
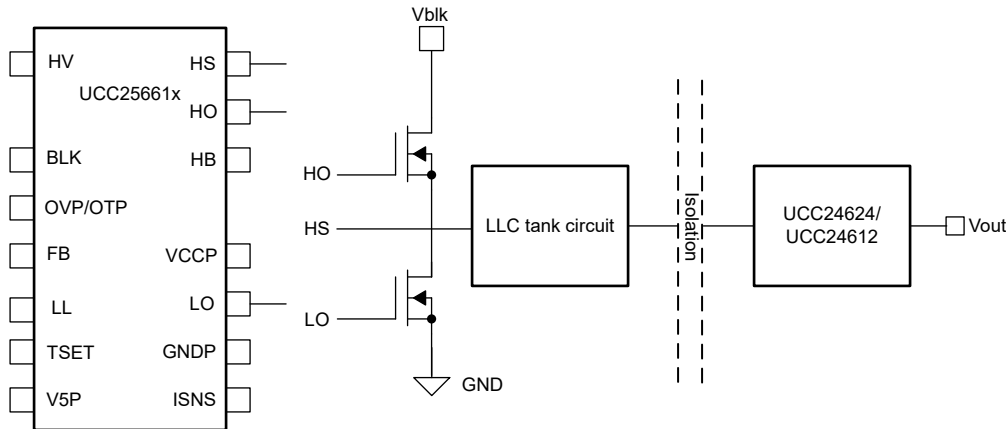


图 3. 使用 UCC25661x 实现典型的 CC-CV 环路

图 3 中的方框图展示了 UCC25661x 在 CC-CV 基准环路中的设计方式。CCref 和 CVref 两个基准通过电阻分压器从 5V 输入设置（根据方程式 1 和方程式 2），其中  $H$  = 电流放大器增益：

$$CC_{\text{ref}} = \left( \frac{V_{\text{out}}}{R_{\text{load}}} \right) \times R_{\text{sense}} \times H \quad (1)$$

$$CV_{\text{ref}} = \left( \frac{R2}{R1 + R2} \right) \times V_{\text{out}} \quad (2)$$

该基准点决定了电池充电器是在电流控制还是电压控制模式下运行。由于对于电池充电器，输出电压随着输出电阻的增加而增加，因此我们需要确保满足电压增益。因此，我们取一定范围的  $V_{\text{out}}$  (最大值、最小值、典型值)，并尝试使 LLC 增益与 Mg 曲线相匹配。由于 UCC25661x 具有宽  $V_{\text{out}}$ ，因此我们可以在增益曲线中随  $V_{\text{out}}$  的变化提供良好的裕度。您可以使用 [UCC25661x 设计计算器](#)，填入  $V_{\text{out}}$  值与谐振腔参数，即可查看对应参数下的增益曲线。

总之，德州仪器 (TI) 的 UCC25661x 在电池充电技术方面取得了重大进步，可为要求严苛的应用提供独特的优化和简化设计。此控制器利用 IPPC 机制和宽输入/输出电压工作范围，从根本上简化了 CC-CV 充电环路的设计和实现。与通常需要复杂调优和优化的传统 LLC 谐振控制器不同，UCC25661x 固有地可更大限度地提高功率传输效率，并在广泛的输入电压和负载条件下保持严格的电压调节。有关详细的设计指南和应用特定建议，请参阅德州仪器 (TI) 网站上提供的 [UCC25661x 数据表](#) 和相关应用手册。

## 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、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