

Technical Article

构造 LLC-SRC 增益曲线以满足电池充电器需求



John Dorosa

越来越多的家用电器正逐渐用可充电电池取代传统的交流电源插头。例如，消费者使用吸尘器时，无需再被限制在墙壁插座旁，反而能更灵活地移动，不必费心整理笨重的电源线。

然而，每一块为电器供电的电池都需要一个电源来为其充电。随着可充电电池在电器中的广泛应用，消费者对电池续航能力的要求也不断提高，希望充电间隔更长。一个简单的解决方案是使用容量更大的电池组；但更大的电池组所需的充电功率远非反激式转换器在合理时间内所能满足。而电感-电感-电容串联谐振转换器 (LLC-SRC) 则提供了一种更高功率的替代方案，其通用性足以满足可移动家用设备的需求。

传统上，LLC-SRC 的设计旨在接近谐振频率的工况下运行，以在输入电压范围较窄且输出电压固定的应用中实现效率最大化，这一点在技术文章《[设计 LLC 谐振半桥电源转换器](#)》中已有探讨。即便如此，仍可通过精心调整谐振回路的设计，使转换器在电池充电周期内电压不断变化的过程中，始终保持高效运行。如果通过功率因数校正 (PFC) 电路供电且输入电压范围较窄，图 1 中所示的 LLC-SRC 可成为电池充电器的理想拓扑结构选择。

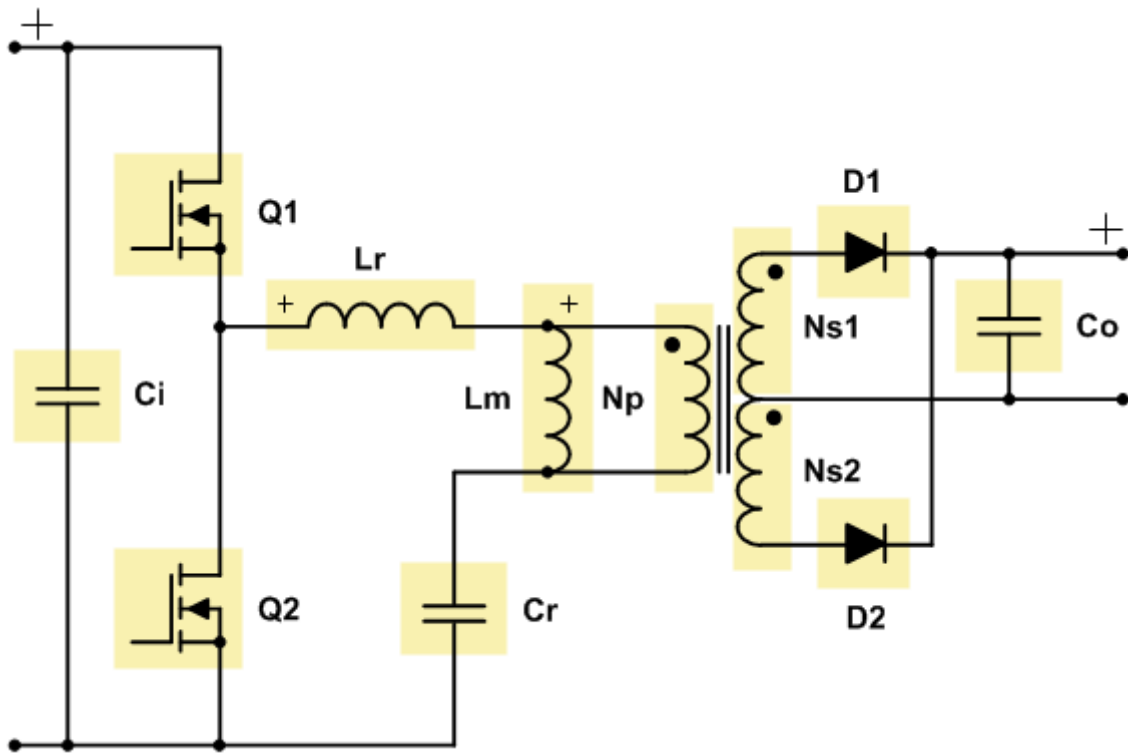


图 1. 以 L_r 、 L_m 和 C_r 作为谐振元件的半桥 LLC-SRC，搭配 PFC 前端电路后，即可用作电池充电器。

电池充电器主要有两种工作模式：恒流模式和恒压模式。当电池电压较低时，充电器向电池输出恒定电流。随着电池组充电，电池组电压逐渐升高。一旦电压达到设定值，充电器的控制环路便切换至恒压模式，进入恒压模式后，充电器会维持电池的最大额定电压，同时充电电流逐渐减小，直至趋近于零。

该模式能确保电池在充电终止前充分充至满容量。图 2 展示了单节锂离子电池随时间变化的充电曲线示例。在更复杂的充电系统中，还会包含额外功能，例如针对深度放电电池的涓流充电设置，或是可编程调节的充电电流与最大电压参数。但总体而言，向电池供电的过程可简化为恒压或恒流两种核心模式。

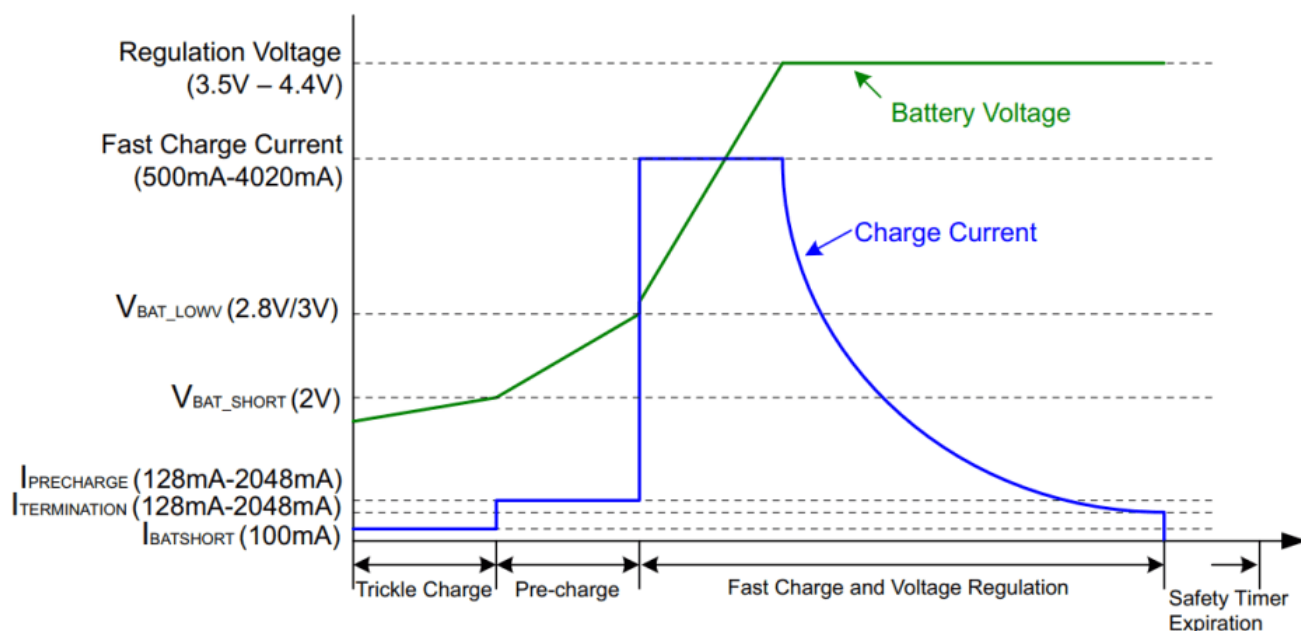


图 2. 单节锂离子电池的充电周期通常可将电池电压充至 3.5 – 4.4V。如果需获得更高的电池组电压，可将多节电池串联使用。

LLC-SRC 转换器工作的核心在于其增益曲线的形态。半桥 FET 以固定的 50% 占空比进行开关，通过调节开关频率来维持输出电压的稳定。电压水平与增益曲线的交点（即工作点）决定了输出电压对应的频率。理想情况下，工作点处于增益曲线的电感区域内。下面的公式计算输入至输出电压增益：以下公式用于计算输入至输出的电压增益：

$$V_{out}(R_e, f, V_{in}) = \frac{V_{in}}{2 \cdot n} \cdot \frac{L_m \cdot C_r \cdot R_e}{\sqrt{\left(L_p \cdot C_r \cdot R_e - \frac{R_e}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2}\right)^2 + \left(4 \cdot \pi^2 \cdot f^2\right) \cdot \left(\left(L_r \cdot C_r - \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2}\right) \cdot L_p + L_m \cdot L_r \cdot C_r\right)^2}} \quad (1)$$

这表明，串联谐振元件（ L_m 、 L_r 和 C_r ）以及输出电阻（ R_e ）共同决定了增益曲线的形态。在电池充电器设计中，负载电阻器的影响至关重要，因为在整个工作过程中，输出电流和电压规格会不断变化。

因此，在确定谐振元件的参数值时，必须充分考虑转换器在所有工作点下的性能表现。在充电周期的恒流阶段，工作点会沿着增益曲线向左上方移动。然而，在工作点移动的同时，负载电阻也会发生变化，进而导致增益曲线向上移动。

图 3 为电池充电器的增益曲线示例。为体现负载电阻器的变化差异，该图分别呈现了电池低电量状态（红色曲线）和接近满电状态（绿色曲线）下的两条增益曲线。红色虚线则表明，功率 PFC 输出电压的波动（±5%）会如何改变 LLC 转换器的工作点。不过，在电池满电状态下，这种波动的影响并不明显，因为此时工作点处于增益曲线中位置更高的区域。

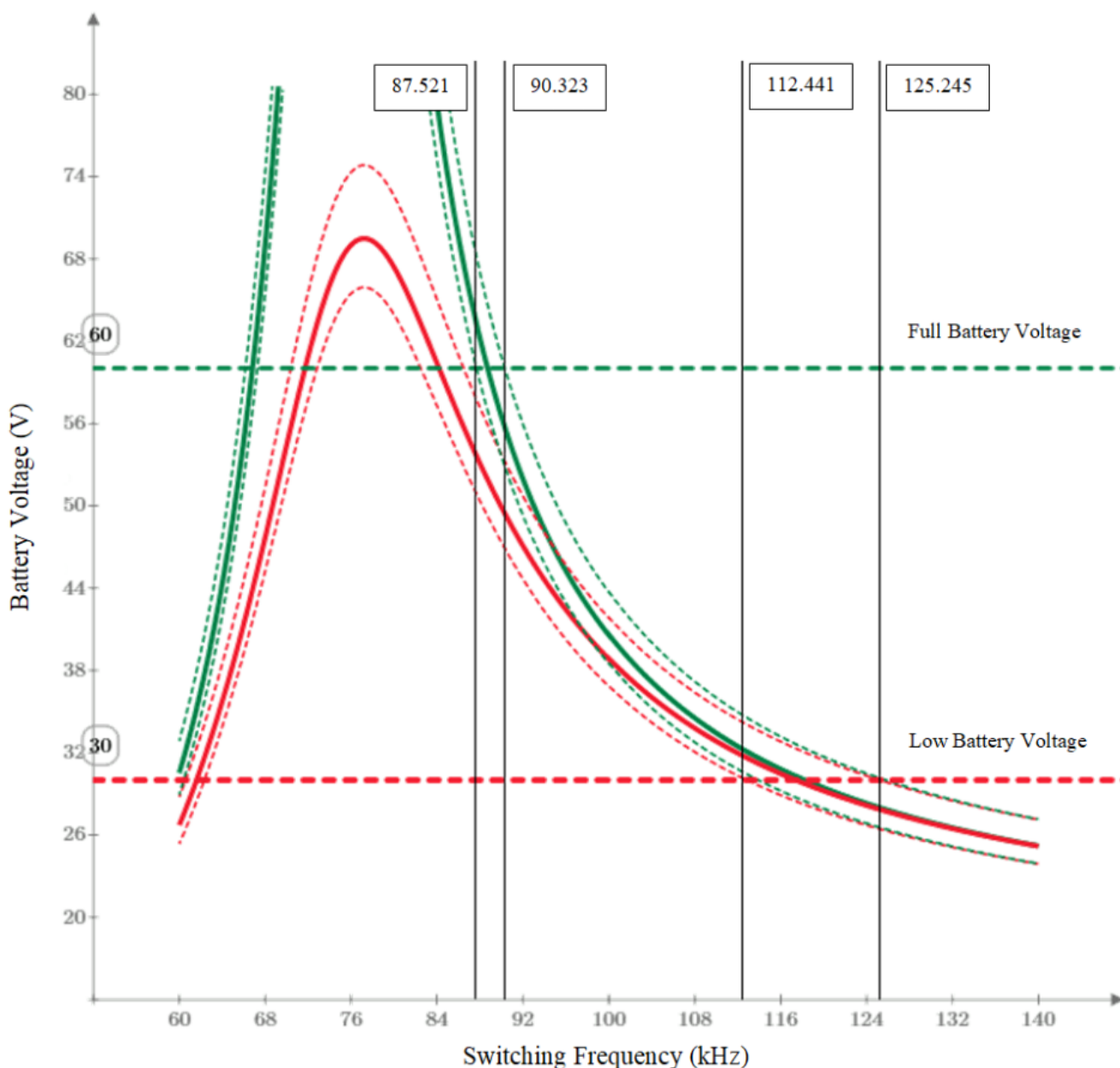


图 3. 用于电池充电器的 LLC-SRC 谐振回路，其输出电压-开关频率增益曲线反映了工作点的变化规律。

30V 和 60V 输出对应的水平标记线，与该充电器所适配的电池化学特性相关。在电池充电过程中，工作点会从红色曲线与 30V 线的交点，逐渐移动到绿色曲线与 60V 线的交点。

在设计增益曲线时，需要考虑多个关键特性。首先，增益曲线必须具备足够的“高度”，以满足电池组所需的输出电压范围。其次，工作频率范围应尽可能窄，以便设计的转换器在充电周期的所有工作点上都具备良好性能。更窄的开关频率范围有助于优化变压器的 AC 损耗。此外，更窄的工作频率范围还能减小励磁电感电流 (I_{Lm}) 的波动。对于 LLC-SRC 而言，如果 I_{Lm} 过大，会增加导通损耗。但如果 I_{Lm} 过低，则可能导致 LLC-SRC 失去零电压开关。因此，在设计过程中必须进行权衡。在电池充电器应用场景中，当电池电量处于最低水平、转换器以较高频率运行时， I_{Lm} 会更低。

匝数比的选择会显著影响转换器可实现的工作电压范围。设计初期，可优先选择针对电池组最低电压优化的匝数比（该参数可在后续设计迭代中调整）。串联谐振元件的选择，将决定转换器的常规工作频率及其增益曲线的斜率。 L_r 与 C_r 的取值会决定谐振频率（实际开关频率将低于谐振频率）。减小 L_m 与 L_r 的比值会使增益曲线“变高”。而增益曲线越高，频率偏差越小。

谐振元件的选取是一个需要反复调整的过程，耗时较长，但一个设计优良的谐振回路能为电池充电器应用提供高效解决方案。图 4 显示了采用 LLC-SRC 拓扑的电池充电器效率曲线。需注意的是，该曲线显示的是包含 PFC 前端损耗在内的整体端到端效率。曲线的 X 轴代表转换器的总输出功率。在充电周期内，随着输出电压和电流的变化，总输出功率会先随电池电压升高而增加，随后随充电电流减小而降低。

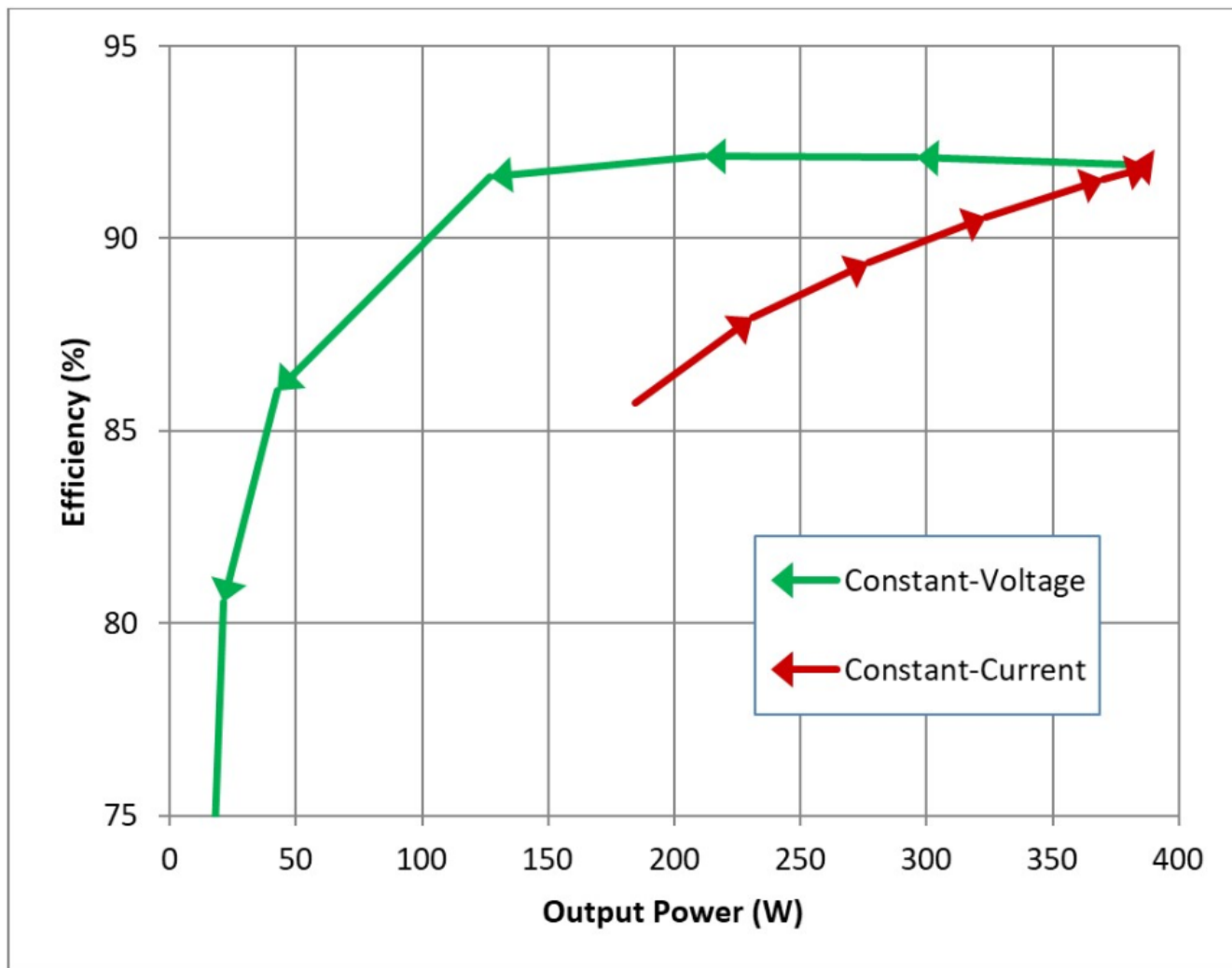


图 4. 效率数据曲线同时体现了 PFC 至 LLC-SRC 电池充电器设计中的两种工作模式。

综上，LLC-SRC 是一种能够实现高效率、且功率等级高于传统反激式转换器电池充电器的拓扑结构，设计人员可以借助其打造出紧凑高效的电源，同时不牺牲整体充电性能。尽管需要对转换器的增益曲线进行定制化设计以适配电池充电应用，但优化谐振回路所需的设计时间，与最终获得的优势相比是值得的。

相关文章：

- [电源技巧 84：Think outside the LLC series resonant converter box](#)
- [电源技巧 89：高频谐振转换器设计注意事项](#)
- [通过能量收集器为超级电容器快速充电](#)
- [确保安全：锂离子电池](#)
- [快速安全地为电池充电](#)
- [锂离子可充电电池设计简介](#)

先前已发布于 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、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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月