

Application Note

具有直通模式的升压转换器设计考量



Carlo Sun, Aurora Tie, Eric Jia

摘要

支持直通模式的升压转换器是一种具有成本效益的设计，适用于输入电压可能超过所需输出电压的应用。使用现有的高侧 FET 而非添加额外的旁路 FET，可降低直通模式下的产品成本。但是，电感器仍保留在功率级电路中，形成欠阻尼 RLC 网络，可能在负载瞬态期间导致输出电压下冲和振铃。因此，必须评估输出电压下冲和恢复时间的影响。本应用笔记提供了上述效应的分析表达式，并通过仿真和实验验证了理论分析。本文档还提供了元件选型指导以满足瞬态要求，并指出直通模式适用于大多数实际应用。

内容

1 简介.....2

2 直通模式稳态和瞬态分析.....2

3 仿真结果.....4

4 测试结果和性能曲线.....5

5 总结.....7

6 参考资料.....7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

具有直通模式的升压转换器用于电源电压超过目标输出 (V_{o_target}) 的应用。当输入电压 (V_{in}) 超过目标输出 (V_{o_target}) 时，高侧 FET 导通，输出电压跟随输入电压。

与旁路拓扑相比，直通模式复用现有的高侧 FET。无需添加旁路 FET，从而降低成本。但是，电感器仍保留在功率级电路中，会在负载瞬态测试期间导致输出电压下冲和振铃。本应用笔记包含以下内容：

1. 输出阻抗与瞬态响应之间的关系
2. 下冲和恢复时间的表达式
3. 仿真和实验验证

2 直通模式稳态和瞬态分析

为了更好地分析直通模式下的瞬态行为，从负载电流 (I_o) 到输出电压 (V_o) 的输出阻抗传递函数如下所示：

$$Z_o(s) = \frac{I_o}{V_o} = - \frac{sL + R_t}{s^2 LC_o + sC_o R_t + 1} \quad (1)$$

其中，

- I_o (A) = 负载电流
- V_o (V) = 输出电压
- L (H) = 电感器
- C_o (F) = 输出电容
- R_t (Ω) = 电路总电阻

详细电路如下所示。

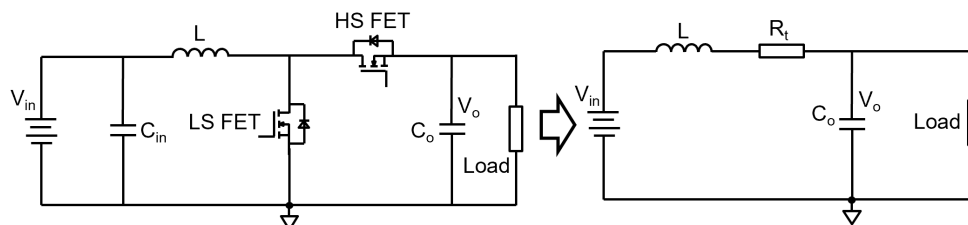


图 2-1. 升压直通模式下的 RLC 等效电路

这是一个包含零点的二阶系统。二阶系统的标准参数定义如下：

阻尼比：

$$\xi = \frac{R_t}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

下冲百分比：

$$\sigma\% = e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \times 100\% \quad (3)$$

固有频率：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

阻尼频率：

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (5)$$

相位角：

$$\varphi = \cos^{-1}\xi \quad (6)$$

恢复时间：

$$t_s = (4\pi - \varphi) / \omega_d \quad (7)$$

对于含零点的二阶系统，零点会影响瞬态行为。下冲和恢复时间可定义如下：

$$\sigma_z\% = \sigma\% \frac{l}{|z|} e^{-\frac{\xi\theta}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (8)$$

其中，

- l ：从零点到极点的长度
- $|z|$ ：零点幅值
- θ ：零点与极点之间的相位角

$$t_{sz} = t_s + \frac{1}{\xi\omega_n} \ln \frac{l}{|z|} \quad (9)$$

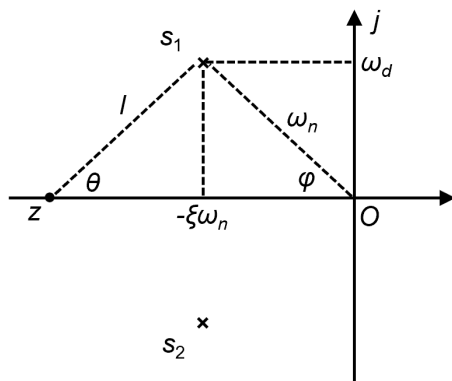


图 2-2. 二阶系统的零极点分布

为了更好地评估瞬态行为，可以将下冲百分比定义如下：

$$Undershoot\% = \frac{\sigma_z}{V_o} \times 100\% \quad (10)$$

对于常见的 DC/DC 应用，下冲百分比应限制在 $\pm 5\%$ 以内。

当 $L=160\text{nH}$ 、 $C_o=22\text{ }\mu\text{F}$ 、 $R_t=55\text{m}\Omega$ 时，MATLAB 计算和 Simplis 仿真的瞬态结果如 图 2-3 和 图 2-4 所示。下冲为 1.01%，满足 $\pm 5\%$ 的要求。计算和仿真结果基本一致。

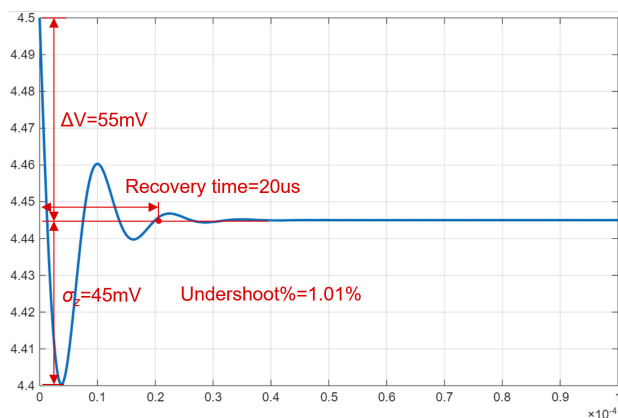


图 2-3. MATLAB 阶跃响应计算结果

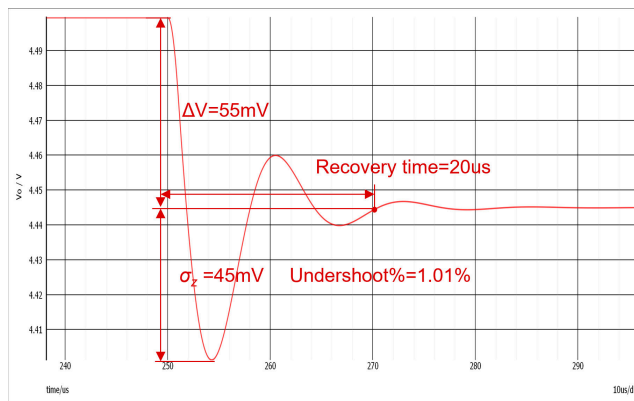


图 2-4. Simplis 阶跃响应仿真结果

3 仿真结果

在直通模式下，当输入电压 (V_{in}) 超过目标输出电压 (V_{out_target}) 时，升压转换器的高侧 FET 完全导通。在电池供电的应用中，电池可建模为具有内阻和电容的电压源。电池提供的高输入电容可降低负载瞬态测试期间的输入电压降。等效电路如图 2-1 所示。

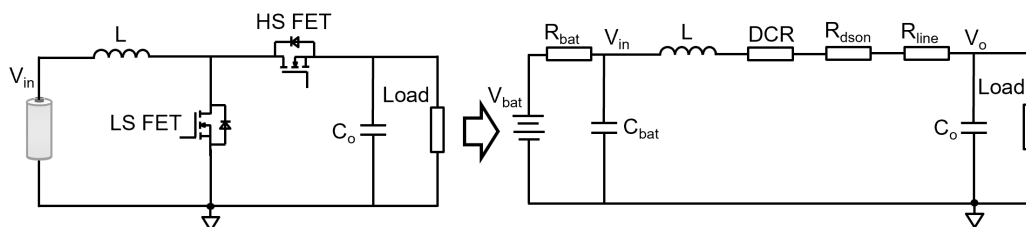


图 3-1. 单电池应用中的 RLC 等效电路

上述电路可建模为电池内阻 (R_{bat})、电感直流电阻 (DCR)、高侧 FET 导通电阻 (R_{dson}) 和 PCB 电阻 (R_{line}) 的串联组合。稳态关系如下：

$$\Delta V = V_{in} - V_o = I_L(DCR + R_{dson} + R_{line}) \quad (11)$$

$$\Delta V_{in} = \Delta I_L R_{bat} \quad (12)$$

其中，

- DCR：电感器直流电阻
- R_{dson} ：高侧 FET 导通电阻
- R_{line} ：PCB 和线路电阻
- R_{bat} ：电池内阻

因此，我们可以合并上述公式并使用以下参数进行仿真。通过这些参数，RLC 电路模型可用于估算直通模式下的瞬态行为。仿真结果如图 3-2 和图 3-5 所示。

表 3-1. 电路参数

参数	值
V_{in}	4.5V
V_{o_target}	3.3V
L	160nH/470nH
C_{in}	2.2mF
C_o	11 μ F

表 3-1. 电路参数 (续)

参数	值
R_{bat}	25m Ω
DCR	3/11m Ω
R_{dson}	18m Ω
R_{line}	10m Ω

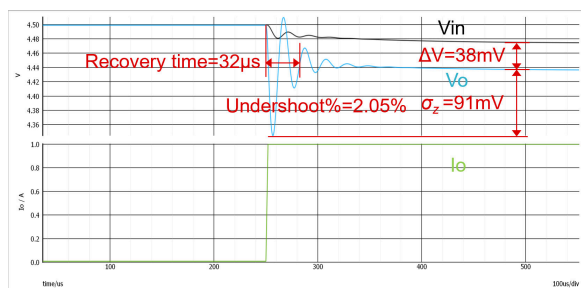


图 3-2. 瞬态仿真, $L=470\text{nH}$ 、 $I_o=0$ 至 1A 、 $1\text{A}/\mu\text{s}$

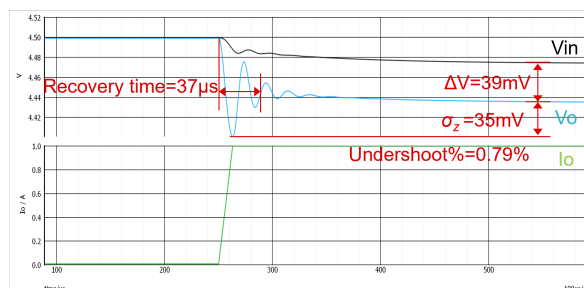


图 3-3. 瞬态仿真, $L=470\text{nH}$ 、 $I_o=0$ 至 1A 、 $0.1\text{A}/\mu\text{s}$

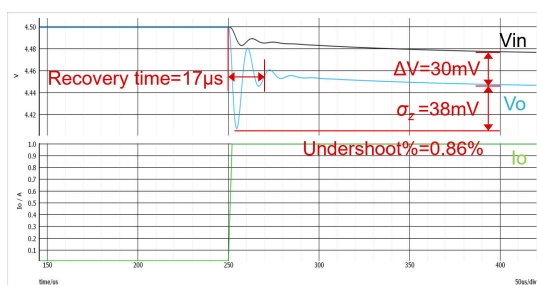


图 3-4. 瞬态仿真, $L=160\text{nH}$ 、 $I_o=0$ 至 1A 、 $1\text{A}/\mu\text{s}$

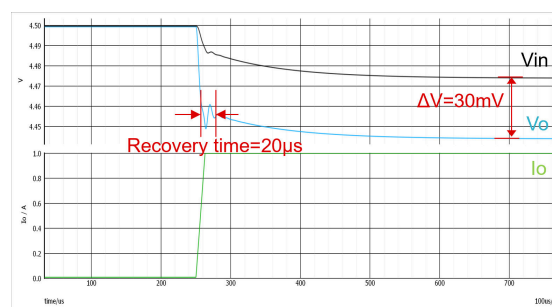


图 3-5. 瞬态仿真, $L=160\text{nH}$ 、 $I_o=0$ 至 1A 、 $0.1\text{A}/\mu\text{s}$

表 3-2. 仿真结果汇总

参数	$\Delta V_{in}/\text{mV}$		$\Delta V/\text{mV}$		下冲百分比		恢复时间/ μs	
电感器/nH	160	470	160	470	160	470	160	470
0-1A, $1\text{A}/\mu\text{s}$	26	26	30	38	0.86%	2.05%	17	32
0-3A, $1\text{A}/\mu\text{s}$	78	78	90	114	3.88%	5.43%	17	32
0-1A, $0.1\text{A}/\mu\text{s}$	26	26	30	39	0%	0.79%	20	37
0-3A, $0.1\text{A}/\mu\text{s}$	78	78	90	117	0%	2.44%	21	37

当电感为 160nH 时, 由于 $0.1\text{A}/\mu\text{s}$ 的电流变化率较慢, V_o 的 σ_z 相对较小, 不会超过稳态值, 因此下冲百分比为 0%。

我们在各种工作条件下进行了仿真, 包括不同的电感、电流和瞬态响应速度。结果表明, 在直通模式下, 输出电压的下冲和恢复时间均可满足大多数应用的要求。

4 测试结果和性能曲线

TPS61022 是一款 0.5V 至 5.5V 输入、2.2V 至 5V 输出的同步升压转换器。该器件支持直通模式。为了进一步验证理论计算和仿真的准确性, 我们选择了该器件进行台架测试。修改后的 TPS61022EVM 原理图如下所示。

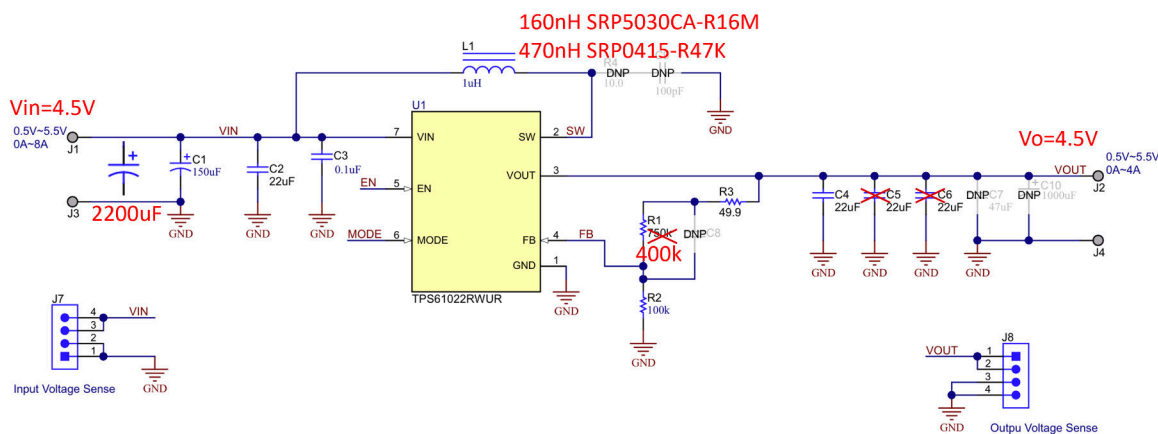


图 4-1. 用于台架测试的 TPS61022EVM 原理图

根据仿真条件，在以下特定条件下以直通模式进行负载瞬态测试： $V_{in}=4.5V$ 、 $V_{out}=4.5V$ 、 $L=470nH$ 和 $160nH$ 、 $C_o=22\mu F$ (有效电容为 $11\mu F$)、自动 PFM 模式。台架测试结果如图 4-2 至图 4-5 所示。

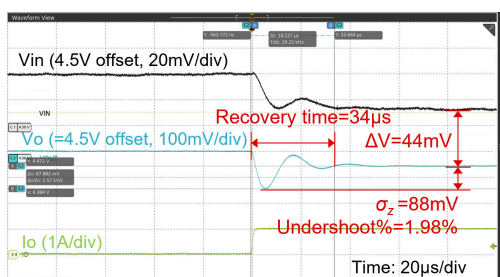


图 4-2. 直通模式下的负载瞬态， $I_o=0$ 至 $1A$ 、 $1A/\mu s$ 、 $L=470nH$

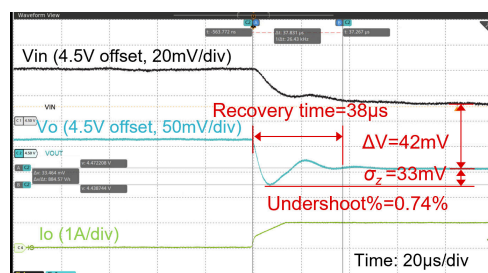


图 4-3. 直通模式下的负载瞬态， $I_o=0$ 至 $1A$ 、 $0.1A/\mu s$ 、 $L=470nH$

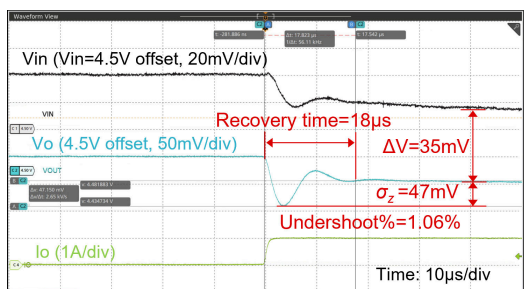


图 4-4. 直通模式下的负载瞬态， $I_o=0$ 至 $1A$ 、 $1A/\mu s$ 、 $L=160nH$

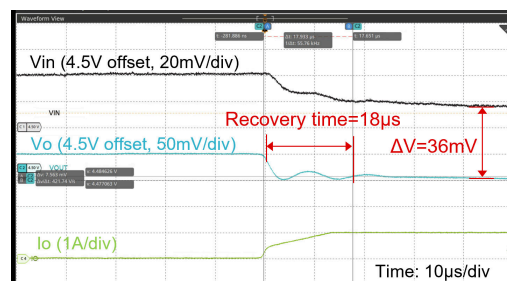


图 4-5. 直通模式下的负载瞬态， $I_o=0$ 至 $1A$ 、 $0.1A/\mu s$ 、 $L=160nH$

表 4-1. TPS61022EVM 台架测试结果汇总

参数	$\Delta V_{in}/mV$		$\Delta V/mV$		下冲百分比		恢复时间/ μs	
电感器/nH	160	470	160	470	160	470	160	470
0-1A, $1A/\mu s$	26	25	35	44	1.06%	1.98%	18	34
0-3A, $1A/\mu s$	78	79	80	106	2.3%	5.71%	19	37
0-1A, $0.1A/\mu s$	26	25	36	42	0%	0.74%	18	38
0-3A, $0.1A/\mu s$	80	81	79	103	0%	0.88%	21	37

当电感为 160nH 时，由于 $0.1A/\mu s$ 的电流变化率较慢， V_o 的 σ_z 相对较小，不会超过稳态值，因此下冲百分比为 0%。

根据表 4-1，大多数测试条件均可满足下冲百分比和恢复时间的要求。与表 3-2 相比，仿真和台架测试结果基本一致。因此，对于大多数应用而言，直通模式的瞬态响应可满足要求并具有成本优势。

此外， ΔV_{in} 和 ΔV 反映稳态响应，与电路板的 DCR、 R_{dson} 和 PCB 电阻相关。下冲百分比和恢复时间与电感器、瞬态压摆率和振幅有关。

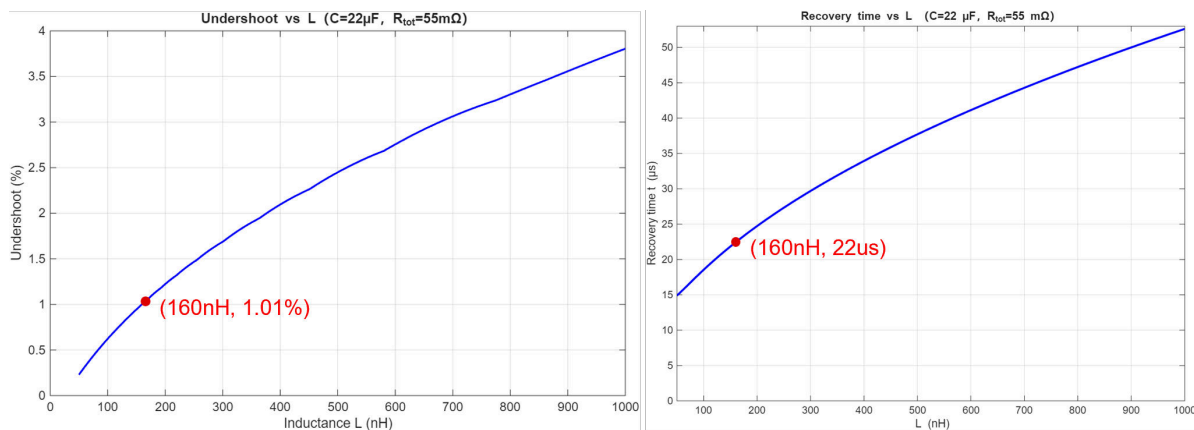


图 4-6. 下冲百分比和恢复时间与电感的关系

5 总结

本应用笔记对 TPS61022EVM 在直通模式下的性能进行了系统分析，并得出以下结论：

1. ΔV_{in} 和 ΔV_o 仅由电源路径中的直流电阻损耗 (R_{bat} 、DCR、 R_{dson} 、 R_{line}) 决定，与 LC 无关。
2. ΔV_{in} 、 ΔV_o 和 V_o 下冲均与负载瞬态幅度成正比，这证实了 RLC 系统模型的线性特性。在实际应用中，0-3A 的下冲约为 0-1A 的三倍。
3. 瞬态性能与 LC 网络、瞬态压摆率和瞬态幅度有关。台架测试结果表明，在典型条件下，输出下冲可保持在 $\pm 5\%$ 以内。这一结果满足大多数实际应用的要求。

总体而言，直通模式易于实现且具有成本效益。直通模式广泛用于各种升压转换器中。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[TPS61022 具有 0.5V 超低输入电压的 8A 升压转换器](#)，数据表
- 德州仪器 (TI)，[TPS61022 评估模块用户指南](#)，EVM 用户指南
- 德州仪器 (TI)，[选择带旁路或直通模式的升压方案](#)，应用笔记

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