

Application Note

了解 D-CAP 降压转换器在 DCM 运行模式下的输出电压纹波



Jerry Wang

摘要

输出电压纹波是降压转换器的一个关键参数，对系统应用有很大的影响，应予以重视。许多教科书和应用手册都详细说明了降压转换器在 CCM 运行模式下输出电压纹波的生成原理。然而，当关注 DCM 运行模式下的输出电压纹波时，并没有对其进行太多详细说明。本应用手册介绍了一种估算 D-CAP、D-CAP2 和 D-CAP3 模式降压转换器在 DCM 运行模式下输出电压纹波的方法。可以根据 TPS56837 给出基准测试结果。还包括误差分析，来说明哪些因素会影响测试结果。最后，本文对 D-CAP 降压转换器在 DCM 和 CCM 运行模式下的输出电压纹波进行了比较。

内容

1 了解降压转换器中的 CCM 输出电压纹波.....	2
2 D-CAP 降压转换器中 DCM 输出电压纹波的计算.....	3
3 基准测试结果和误差分析.....	5
3.1 基准测试结果.....	5
3.2 误差分析.....	6
4 D-CAP 降压转换器中 DCM 和 CCM 输出电压纹波比较.....	8
5 总结.....	9
6 参考文献.....	9

插图清单

图 1-1. CCM 运行模式下的电感器电流图示.....	2
图 2-1. DCM 运行模式下的电感器电流图示.....	3
图 3-1. $I_{OUT} = 0A$ 时的 V_{OUT} 纹波.....	5
图 3-2. $I_{OUT} = 0.1A$ 时的 V_{OUT} 纹波.....	5
图 3-3. $I_{OUT} = 0.2A$ 时的 V_{OUT} 纹波.....	6
图 3-4. $I_{OUT} = 0.3A$ 时的 V_{OUT} 纹波.....	6
图 3-5. $I_{OUT} = 0.4A$ 时的 V_{OUT} 纹波.....	6
图 3-6. $I_{OUT} = 0.6A$ 时的 V_{OUT} 纹波.....	6
图 3-7. $I_{OUT} = 0.8A$ 时的 V_{OUT} 纹波.....	6
图 3-8. 0A 负载下测试的真实高侧 FET 导通时间.....	7
图 4-1. DCM 运行模式下的电感器电流图示.....	8
图 4-2. CCM 运行模式下的电感器电流图示.....	8

表格清单

表 3-1. TPS56837 的工作台设置.....	5
表 3-2. DCM V_{OUT} 纹波比较.....	5

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 了解降压转换器中的 CCM 输出电压纹波

输出电压纹波是降压转换器的一个关键参数，对系统应用有很大的影响，应予以重视。许多教科书和应用手册都详细说明了降压转换器输出电压纹波的生成原理。首先简要介绍降压转换器中的 CCM 输出电压纹波。

在 CCM 运行模式下，电感器电流从开关周期开始时的谷值增加，在高侧 FET 关闭时达到峰值，并在开关周期结束时返回到其谷值。平均电感电流是负载电流。

当仅考虑输出电容器的影响时，输出电容器充放电过程会引起输出电压纹波。图 1-1 中带有 Q1 标记的多余能量将被充电到 C_{OUT} ，从而导致 C_{OUT} 上的电压升高。当电感电流低于负载电流时， C_{OUT} 将放电以保持 V_{OUT} 稳定。因此输出电压纹波将通过 [方程式 1](#) 和 [方程式 2](#) 计算。

$$Q1 = \frac{\Delta I_L \times T_{SW}}{8} \quad (1)$$

$$\Delta V_{OUT} = \frac{Q1}{C_{OUT}} = \frac{\Delta I_L \times T_{SW}}{8 \times C_{OUT}} \quad (2)$$

问题 1：能量过多

T_{SW} ：开关周期

ΔV_{OUT} ：输出电压纹波

C_{OUT} ：输出电容器的值

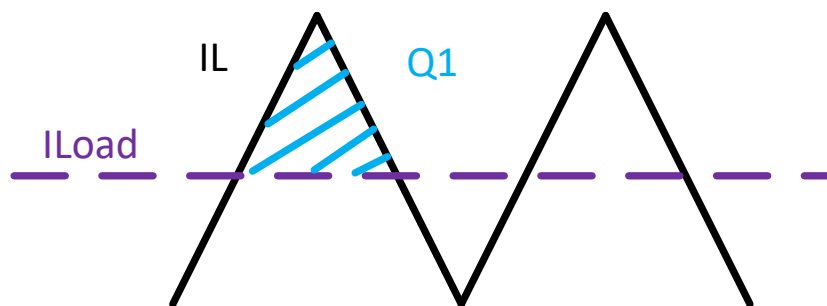


图 1-1. CCM 运行模式下的电感器电流图示

2 D-CAP 降压转换器中 DCM 输出电压纹波的计算

然而，CCM 输出电压纹波计算方法并非专为 DCM 运行模式而设计。因此，有必要首先了解 DCM 运行模式中的行为。

DCM 运行模式广泛用于 ECO 模式降压转换器，这是一种可在轻负载运行中实现高效率的运行模式。当电感器电流降至 0A 时，高侧 FET 和低侧 FET 将关闭。转换器将进入称为空闲时间的工作期，在空闲时间内不会导通 FET，输出电压持续下降。这与降压转换器中的 CCM 运行模式有很大不同。对于 D-CAP 转换器，当 V_{out} 降至 $V_{FB}-V_{REF}=0$ 时，内部导通计时器将工作，使高侧 MOSFET 导通恒定导通时间，然后开始下一个开关周期。D-CAP2 和 D-CAP3 控制的工作原理与 D-CAP 类似，但配备了内部纹波注入网络，使转换器易于使用。有关 D-CAP 控制模式的更多详细信息，请参阅以下应用手册：[全陶瓷输出电容器的 D-CAP 模式应用](#)。

由于存在空闲时间，因此可能会有一段时间电感电流变为零，这意味着用于计算 DCM 运行模式中输出电压纹波的公式可能与用于计算 CCM 运行模式中输出电压纹波的公式不同。以下部分将介绍用于计算 DCM 运行模式中输出电压纹波的方法。

当主要考虑输出电容器的影响时，用于计算 DCM 运行模式中输出电压纹波的关键项与 CCM 运行模式相同：找到输出电容器中的电荷。

将一个典型的 DCM 运行模式作为分析案例，图 2-1 展示了其电感器运行图示。在下面的分析中，仅考虑电容输出电压纹波。

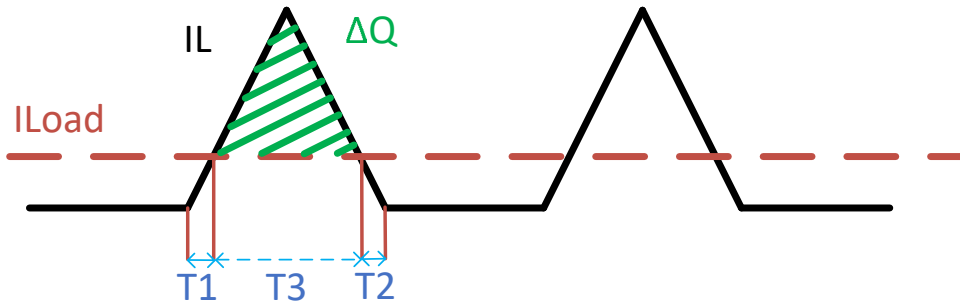


图 2-1. DCM 运行模式下的电感器电流图示

在分析之前可以强调的一个关键项是一个脉冲的时间周期，或称为开关周期，它表示高侧 FET 导通时间加上低侧 FET 导通时间的周期（忽略上升沿和下降沿的死区时间）。对于 D-CAP 控制， V_{in} 和 V_{out} 固定后，高侧 FET 的导通时间是固定的，电感电流的压摆率会上升和下降，这意味着无论在 DCM 运行模式中，还是在 CCM DCM 运行模式中，电感器峰值电流和低侧 FET 的导通时间都是固定的。因此，在 CCM 和 DCM 运行模式下，一个脉冲的时间周期都是固定的，将在下面的说明中用图示进行表示。

在图 2-1 中，棕色线表示加载当前 I_{Load} 。在电感电流超过 I_{Load} 的时间段内，过多的电荷 ΔQ 将涌入输出电容器，从而导致输出电压纹波。

ΔQ 是当电感电流超过 I_{Load} 时，时间和电感电流的积分，就是图 2-1 中标记的绿色阴影三角形区域。求出绿色阴影三角形底边的高度和宽度，即可得到其面积值，即 ΔQ 。高度可通过以下公式轻松求出：高度 = $I_{L_{PEAK}} - I_{Load}$ ，而 $I_{L_{PEAK}}$ 是电感电流的峰值。在 DCM 运行模式下，由于电感从 0 增加到其峰值，所以 $I_{L_{PEAK}}$ 在 DCM 运行模式下等于 ΔI_L 。方程式 3 用于得到 ΔQ 。

$$\Delta Q = 0.5 \times (\Delta I_L - I_{Load}) \times T_3 \quad (3)$$

三角形的底边是用 T_3 标记的时间段。对于 D-CAP 控制，当 V_{in} 和 V_{out} 固定时，无论是在 CCM 运行模式下，还是在 DCM 运行模式下，高侧 FET 的导通时间和低侧 FET 的导通时间都是固定的。因此， T_1 、 T_2 和 T_3 之和等于正常 CCM 运行模式下的开关周期。电感电流的上升压摆率和下降压摆率也是固定的，这意味着可以通过将电感器上升压摆率除以 I_{Load} 求得 T_1 ，如方程式 4 所示。可以使用与计算 T_1 相同的方法来计算 T_2 ，如方程式 5 所示。求出 T_1 和 T_2 后，可以使用方程式 6 得到 T_3 。

$$T_1 = \frac{I_{Load}}{SR_{rising}} = \frac{I_{Load} \times L}{V_{IN} - V_{OUT}} \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{I_{Load}}{SR_{falling}} = \frac{I_{Load} \times L}{V_{OUT}} \quad (5)$$

$$T_3 = T_{SW} - T_1 - T_2 = T_{SW} - \frac{I_{Load} \times L \times V_{IN}}{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})} = \frac{1}{F_{SW}} - \frac{I_{Load} \times L \times V_{IN}}{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})} \quad (6)$$

因此，可以使用 [方程式 7](#) 计算出 ΔQ ：

$$\Delta Q = 0.5 \times \left(\frac{V_{OUT} \times (1 - D)}{L \times F_{SW}} - I_{Load} \right) \times \left(\frac{1}{F_{SW}} - \frac{I_{Load} \times L \times V_{IN}}{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})} \right) \quad (7)$$

其中 D 是降压转换器的占空比， F_{SW} 是 CCM 运行模式下的开关频率。

得到 ΔQ 的值后，可以通过 [方程式 8](#) 计算出输出电压纹波 ΔV_{OUT} ：

$$\Delta V_{OUT} = \frac{\Delta Q}{C_{OUT}} = \frac{0.5}{C_{OUT}} \times \left(\frac{V_{OUT} \times (1 - D)}{L \times F_{SW}} - I_{Load} \right) \times \left(\frac{1}{F_{SW}} - \frac{I_{Load} \times L \times V_{IN}}{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})} \right) \quad (8)$$

请注意，上述分析仅考虑电容纹波。如果输出电压纹波计算中还包含 ESR，可以实现 [方程式 9](#)：

$$\Delta V_{OUT} = \frac{0.5}{C_{OUT}} \times \left(\frac{V_{OUT} \times (1 - D)}{L \times F_{SW}} - I_{Load} \right) \times \left(\frac{1}{F_{SW}} - \frac{I_{Load} \times L \times V_{IN}}{V_{OUT} \times (V_{IN} - V_{OUT})} \right) + ESR \times \left(\frac{V_{OUT} \times (1 - D)}{L \times F_{SW}} - I_{Load} \right) \quad (9)$$

需要强调的是，计算时需要使用 C_{OUT} 的有效值，即需要考虑直流偏置效应。上述计算在 DCM 运行模式下 ΔV_{OUT} 的方法不仅适用于 D-CAP 器件，也适用于 D-CAP2 和 D-CAP3 器件。

3 基准测试结果和误差分析

3.1 基准测试结果

选择 TPS56837 进行基准测试。TPS56837 是一款高效且易于使用的同步降压转换器，具有 4.5V 至 28V 的宽输入电压范围，并在输出电压为 0.6V 至 13V 时支持高达 8A 的连续输出电流。此开关模式电源 (SMPS) IC 通过提供 Eco 模式 (脉冲跳跃) 针对需要极低功耗的应用 (例如打印机、DTV、监视器和一些工业应用) 进行了优化。

基准测试是在 TPS56837EVM 上完成的。有关详细信息，请参阅 [TPS56837EVM 评估模块用户指南](#)。表 3-1 中列出了工作台测试设置和配置。

表 3-1. TPS56837 的工作台设置

V _{IN} (V)	V _{OUT} (V)	L (μH)	C _{out} (μF)	CFF (pF) / C15	RFF (kΩ) / R14	R _{top} (kΩ) / R9	R _{bot} (kΩ) / R8	模式
24	5	3.3	2 × 22μF (1210, 25V)	150	0	73.2	10	PSM / 500kHz

表 3-2 对结果进行了汇总。所有测试都是在 24V_{in} 至 5V_{out}、500kHz 设置下进行的。负载由 0A 变为 0.8A。在计算中考虑了直流偏置效应，并使用了 C_{OUT} 的有效值。方程式 9 用于计算，对计算值、基准测试值和 Webench 仿真值进行 7 次比较。

表 3-2. DCM V_{OUT} 纹波比较

V _{IN} (V)	V _{OUT} (V)	I _{OUT} (A)	计算出的 ΔV _{OUT} (mV)	测试的 ΔV _{OUT} (mV)
24	5	0	65.38	64.4
24	5	0.1	60.14	58.8
24	5	0.2	55.11	51.6
24	5	0.3	50.31	46.0
24	5	0.4	45.73	40
24	5	0.6	37.22	30.8
24	5	0.8	29.58	23.4

从表中可以清楚地看出，计算结果与基准测试结果相比没有太大误差，这意味着可以将其用于估计 D-CAP 器件在 DCM 运行模式下的输出电压纹波。对于 Webench 仿真，仿真结果在大多数负载条件下确实没有太大偏差，可以作为设计参考。

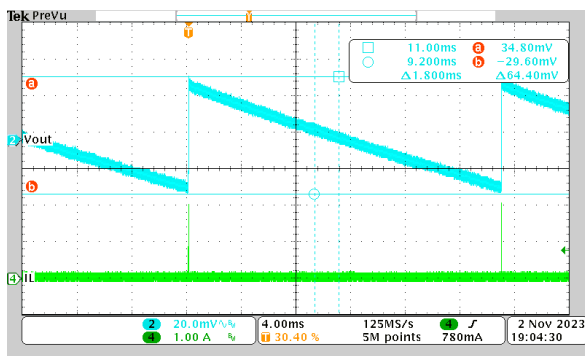


图 3-1. I_{OUT}= 0A 时的 V_{OUT} 纹波

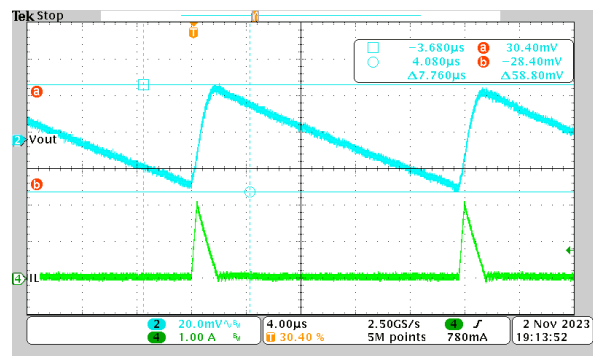


图 3-2. I_{OUT}= 0.1A 时的 V_{OUT} 纹波

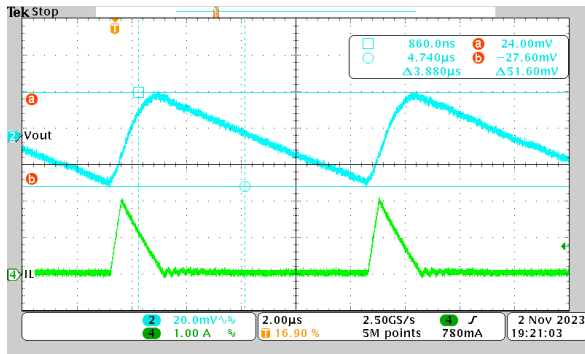


图 3-3. $I_{OUT} = 0.2A$ 时的 V_{OUT} 纹波

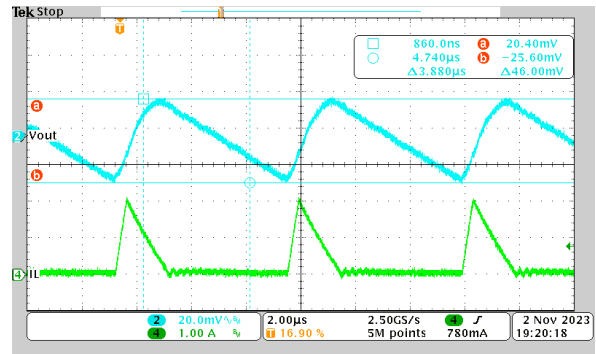


图 3-4. $I_{OUT} = 0.3A$ 时的 V_{OUT} 纹波

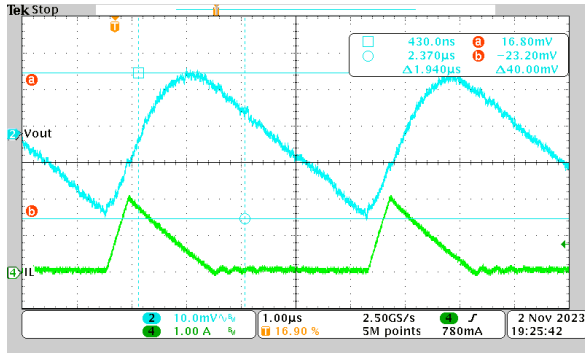


图 3-5. $I_{OUT} = 0.4A$ 时的 V_{OUT} 纹波

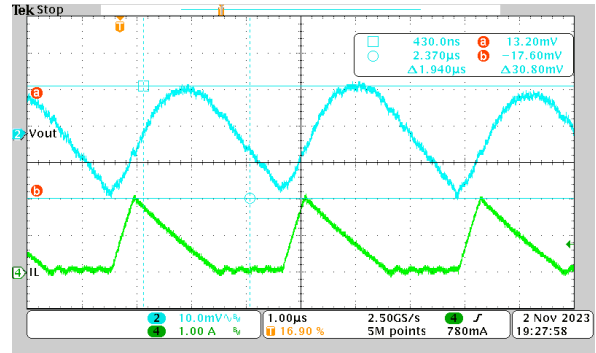


图 3-6. $I_{OUT} = 0.6A$ 时的 V_{OUT} 纹波

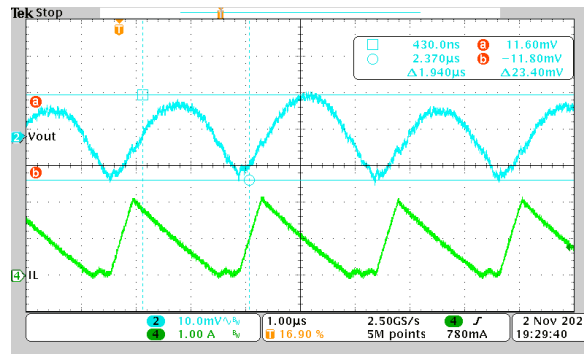


图 3-7. $I_{OUT} = 0.8A$ 时的 V_{OUT} 纹波

3.2 误差分析

虽然计算结果与基准测试结果匹配较好，但仍然存在误差。可以分析存在误差的原因，并给出可能导致误差的其他因素。

3.2.1 高侧 FET 导通时间变化

表 3-1 展示了基准测试结果小于计算结果。能够造成这种影响的因素是高侧 FET 导通时间。虽然在 D-CAP 控制中一旦 V_{in} 和 V_{out} 固定了，此值就固定了，但内部电路的非理想特性无法使其与计算值精确匹配。不同的高侧 FET 导通时间会使电感器电流上升到与估计值不同的峰值，也会导致不同的输出电压纹波。

图 3-8 展示了测试中真实的高侧 FET 导通时间。计算出的高侧 FET 导通时间约为 417ns，而实际测试显示为 410ns。高侧 FET 导通时间的这种收缩会使输出电压纹波小于计算值，这与表 3-1 中所示的趋势相匹配。

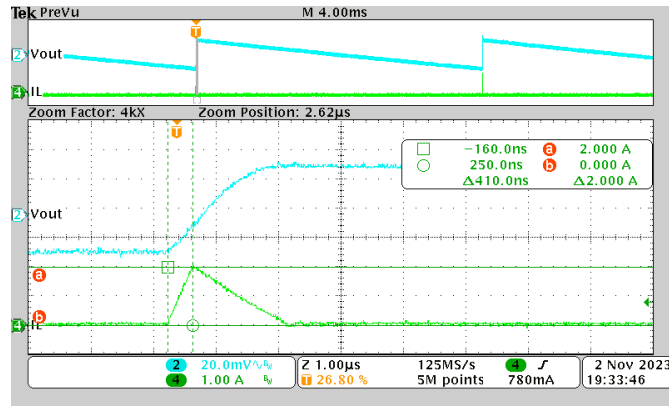


图 3-8. 0A 负载下测试的真实高侧 FET 导通时间

3.2.2 元件值的变化

应用中还需要考虑其他一些因素。由于使用的元件不是理想元件，因此在大规模量产时会存在偏差

基准测试中使用的 C_{OUT} 是 EVM 上组装的默认电容器，其器件型号为 GRM32ER71E226KE15L。根据其规格，典型值在大规模量产时有 $\pm 10\%$ 的变化。仅工作温度变化时，电容变化率为 $\pm 15\%$ 。

除了输出电容外，电感值也会因非理想特性而变化。使用的电感也是 EVM 默认电感，其器件型号为 744325330。电感器的电感值有 $\pm 20\%$ 的变化，这可能导致电感器电流和输出电压纹波的峰值不同。

所有前面提到的变化都会导致计算的输出电压纹波和测试的输出电压纹波不匹配。

4 D-CAP 降压转换器中 DCM 和 CCM 输出电压纹波比较

经常提及 DCM 波纹和 CCM 波纹之间的比较。从工作台测试结果来看，DCM 纹波高于 CCM 纹波，但很少有资料对其进行基本分析。本节将分析 D-CAP 降压转换器中的 DCM 纹波高于 CCM 纹波的原因。

图 4-1 展示了 DCM 运行模式下和 CCM 运行模式下的电感器电流。根据以上对 DCM 纹波计算的分析，流入输出电容器的过量电荷（即阴影标记的三角形区域）决定了输出电压纹波的值。

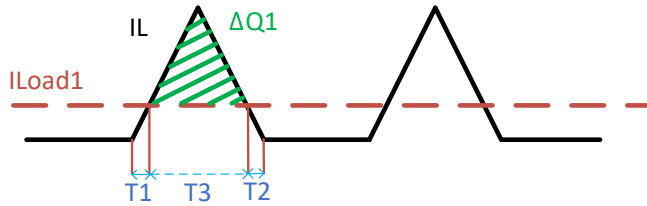


图 4-1. DCM 运行模式下的电感器电流图示

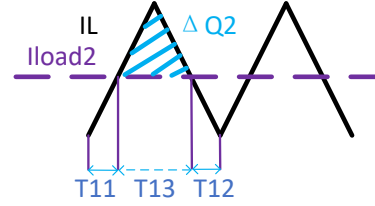


图 4-2. CCM 运行模式下的电感器电流图示

一个脉冲的时间周期（ $T_1 + T_2 + T_3$ 和 $T_{11} + T_{12} + T_{13}$ ，如图 4-1 和图 4-1 中所示）在 CCM 和 DCM 运行模式下相同，如方程式 10 所示。

$$T_{sw} = T_1 + T_2 + T_3 = T_{11} + T_{12} + T_{13} \quad (10)$$

同时，在 CCM 和 DCM 运行模式下，电感器上升压摆率和下降压摆率相同，这意味着 ΔIL 也相同。在 CCM 运行模式下，过多的电荷为 ΔQ_2 ，这是通过使用方程式 12 实现的，并且其负载 I_{load2} 等于 $0.5 \Delta IL$ 。而在 DCM 运行模式下，过多的电荷为 ΔQ_1 ，可通过方程式 11 计算得出。

$$\Delta Q_1 = 0.5 \times (\Delta IL - I_{load1}) \times T_3 \quad (11)$$

$$\Delta Q_2 = 0.5 \times I_{load2} \times T_3 \quad (12)$$

对于 DCAP 控制，一旦负载低于 $0.5 \Delta IL$ ，转换器就会进入 DCM 运行模式，因此 $\Delta IL - I_{load1} > 0.5 \Delta IL$ 会导致 $\Delta IL - I_{load1} > I_{load2}$ 。

根据上一部分中的计算，由于 I_{load2} 高于 I_{load1} ，因此 I_{load2} 的上升时间和下降时间都高于 I_{load1} 的上升时间和下降时间，从而导致比较结果如下：

$$T_{11} + T_{12} > T_1 + T_2 \quad (13)$$

$$T_{sw} - (T_1 + T_2) > T_{sw} - (T_{11} + T_{12}) \quad (14)$$

$$T_3 > T_{13} \quad (15)$$

从之前的分析可以清楚地看出， $\Delta Q_1 > \Delta Q_2$ 意味着在 DCM 运行模式中，有更多的能量被充入 C_{out} 。因此，D-CAP 降压转换器中的 DCM 输出电压纹波高于 CCM 运行模式中的输出电压纹波。

5 总结

总之，本应用手册介绍了估算 D-CAP 控制模式器件在 DCM 运行模式下的输出电压纹波方法。进行了误差分析以显示可能影响相关性的元件。最后，对 DCM 运行模式和 CCM 运行模式下的输出电压纹波进行比较并进行基本分析，从理论上证明了 DCM V_{OUT} 纹波高于 CCM V_{out} D-CAP 降压转换器中的 CCM V_{out} 纹波。

需要强调的是，本文不仅适用于 D-CAP 降压转换器，还适用于 D-CAP2 和 D-CAP3 降压转换器。

6 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [TPS56837 4.5V 至 28V 输入、8A 同步降压转换器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [全陶瓷输出电容器的 D-CAP 模式应用](#) 应用手册。
3. 德州仪器 (TI), [TPS56837 降压转换器评估模块](#) 用户指南。

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司