

## Technical Article

**D-CAP3：优于原版的续篇**

George Lakkas

如今的电源系统设计工程师正面临日益严峻的挑战，即需要在更短的时间内完成设计，同时以极少的补偿电路和工作量确保系统在整个工作环境中保持稳定。环路补偿需要时间，并会增加额外的补偿网络元件，从而增加成本并降低可靠性。D-CAP 通过不需要环路补偿来解决这一问题。

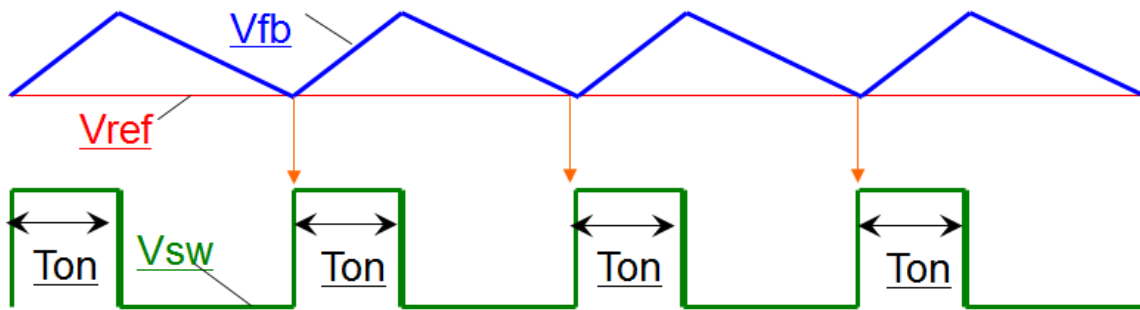


图 1. D-CAP 控制模式

先进的 D-CAP™ 控制架构由 TI 于 2004 年首次发明，是电流模式控制的一种形式。术语 D-CAP 的含义是电流信息在输出电容器上被直接检测得到：其中 **D** 表示直接 (Directly)，**CAP** 表示跨输出电容器检测。TI 的首款 D-CAP 控制器 [TPS51116](#) 通过将控制器与恒定导通时间调制器相结合而实现。目前，TI 已拥有一系列具备各种调制器以及原版 D-CAP 控制的下一代形式的产品 (图 1)。

D-CAP 控制架构的三种形式是：

D-CAP 模式 (使用外部纹波注入)

- 采用恒定导通时间或固定频率调制器。
- 在输出大容量电容器上使用 ESR 来稳定环路。
- 采用外部 RCC 的 DCAP 可搭配所有 MLCC 输出电容器工作。

D-CAP2 模式

- 通过内部相位补偿支持输出陶瓷电容器。
- 内部电感器纹波电流“仿真器”电路用于为 D-CAP2 控制生成足够的斜坡，以便比较输出电压与基准电压，从而确定是否开启 PWM。

D-CAP3 模式

- 借助内部相位补偿支持输出陶瓷电容器。
- D-CAP3 实现了基于占空比的自适应斜坡补偿选择，以改善瞬态性能并拓宽 LC 输出滤波器范围。
- D-CAP3 模式通过实现专用电路来消除半周期斜坡幅度，从而提高输出电压设定点精度。观看“[D-CAP3 控制模式降压 FET 转换器](#)”了解更多信息。

请注意，所有形式的 D-CAP 控制架构均采用自适应导通时间控制。通过发送 VIN、VOUT 和 IOUT 来调整 PWM 导通时间 (图 2)。

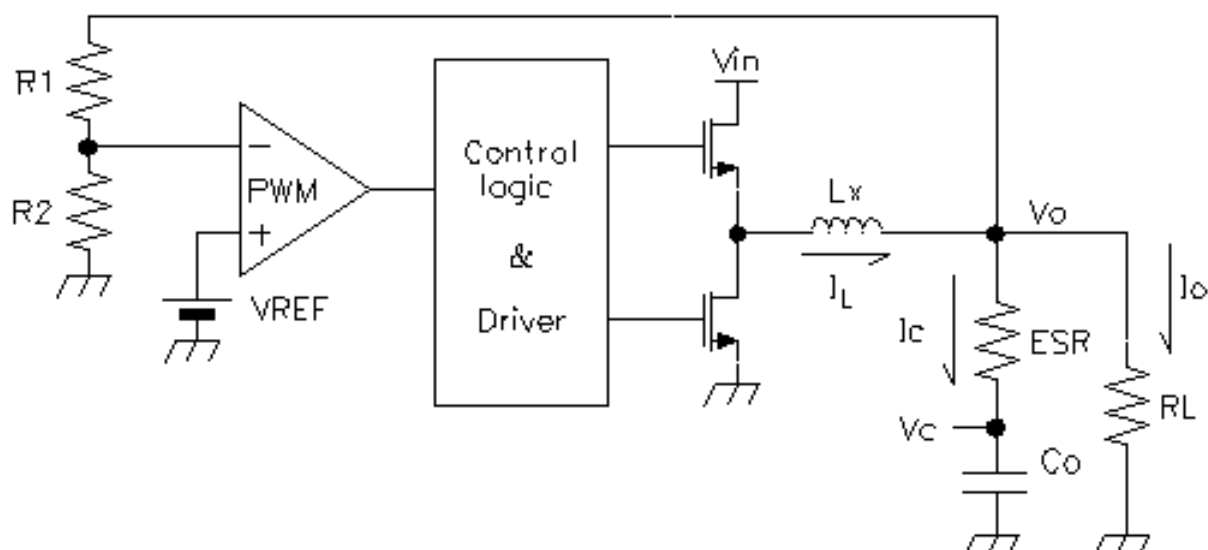


图 2. PWM 比较器使 Vo 保持恒定

$$V_o = V_c + I_c \cdot ESR = \text{const.}$$

$$\frac{1}{2\pi \times ESR \times C_o} \leq \frac{f_{SW}}{k}$$

k: 3, 4, 5... 10  
 SP-CAP : 220μF/15mΩ ... 48kHz  
 Ceramic CAP: 22μF/3mΩ ... 2.4MHz

Determined only by output capacitor characteristics

图 3. 由输出电容器确定的环路稳定性

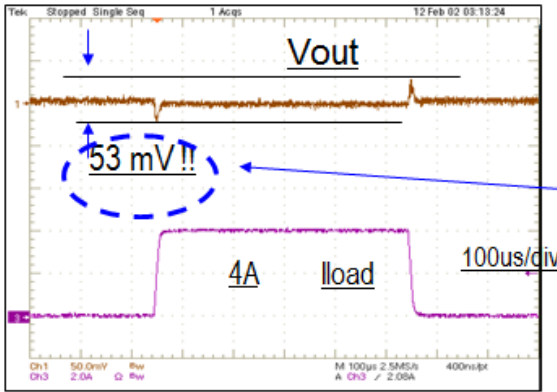
### D-CAP 控制模式的工作原理

D-CAP 控制模式将分压后的反馈电压（该电压来自输出电压纹波并包含输出电压信息）与输出电压设定点进行比较，从而决定是否开启 PWM。当 VBF 低于 VREF（输出电压设定点）时，下一个导通周期随即启动。导通周期持续预定时间，输出电压偏移了输出电压纹波的一半，因此需要相应地设计反馈（图 3）。

D-CAP 控制基本上是一种非线性控制模式，不需要相位补偿。在相同负载瞬态下，与电压模式控制和电流模式控制相比，D-CAP 控制能提供更快的负载瞬态响应。这会减少输出电容器数量，提高功率密度，降低 BOM 成本并提高可靠性。

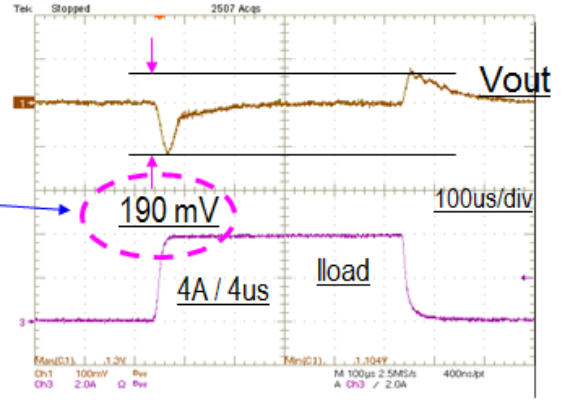
如下方图 4 所示，与电压模式相比，在相同的负载瞬态条件下，D-CAP 控制的负载瞬态响应要快得多。

### Fast Load Transient Response!



#### D-CAP mode transient response

TPS53114  $C_{out}=22\mu F \times 3$



#### Voltage mode transient response

TPS5124  $C_{out}=100\mu F \times 4$

图 4. D-CAP 控制与电压模式

D-CAP 的瞬态响应速度很快，因为输出电容器的 ESR 可对任何负载变化进行即时反馈。D-CAP PWM 比较器在几个 10ns 内以一个导通脉冲阵列进行响应。

导通脉冲频率升高至一个非常高的值，电感器电流在极短时间内上升以匹配输出电流，从而减少了对输出电容器的需求 (图 5)。

$I_{OUT} = 0.1A \text{ to } 10A$   
 $V_{IN} = 10V$   
 $V_{OUT} = 1.05V$   
 $F_{SW} = 270kHz$   
 $L_X = 1\mu H$   
 $C_{OUT} = 440\mu F$   
 $ESR = 6m \text{ Ohms}$

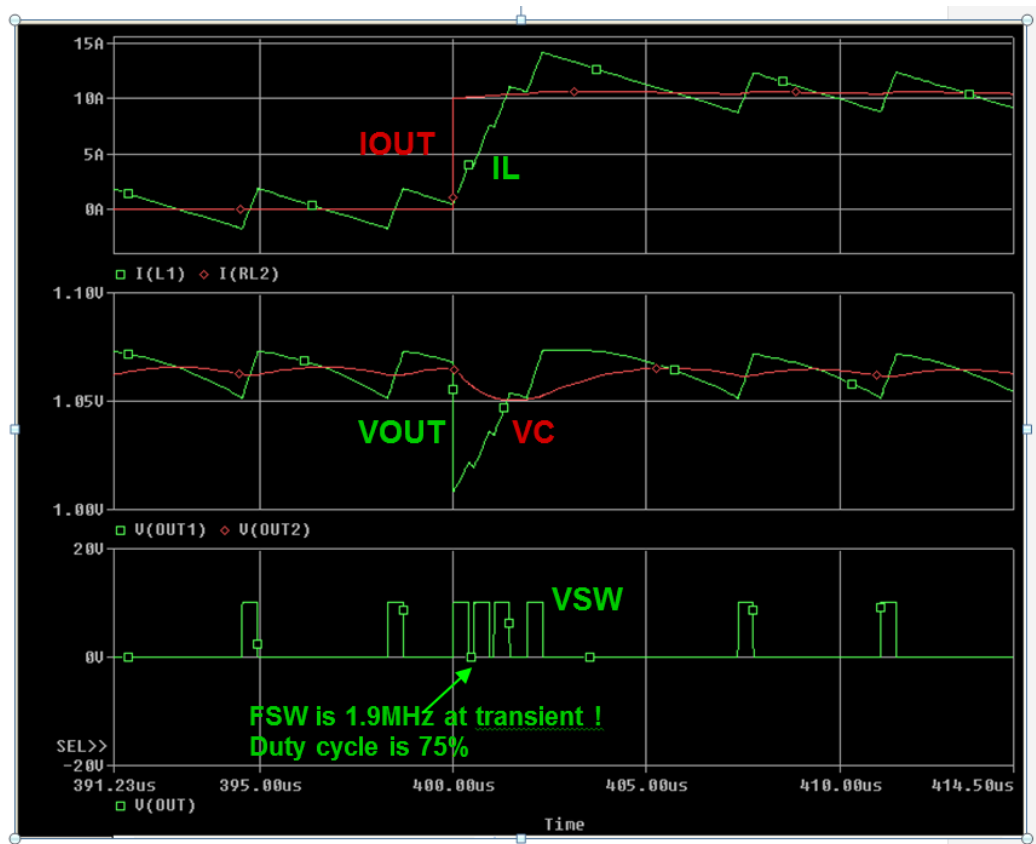


图 5. D-CAP 控制环路 PWM 对负载电流变化的响应

电压模式控制使用具有带宽限制的误差放大器。它为误差放大器提供电压和基准，但对输出电压变化的响应较为缓慢。

此外，尽管 D-CAP 模式的 DC/DC 转换器和控制器中没有时钟，但其开关频率容差很小，并在工作范围内极其稳定 (图 6)。

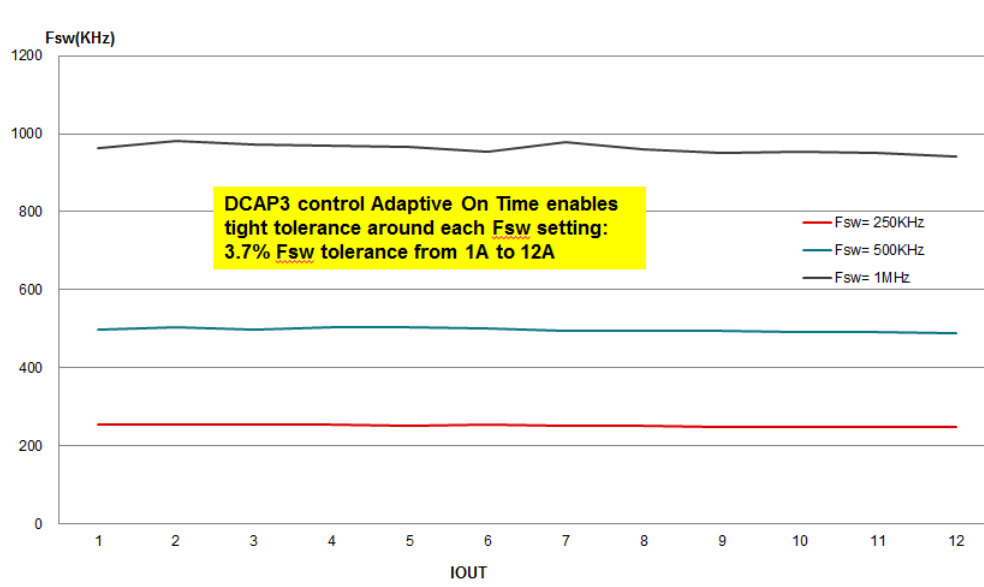


图 6. DCAP-3 开关频率与输出电流间的关系

D-CAP3 是最新版本，与之前的模式相比具有显著的负载调节优势。它增加了一个特殊电路，用于消除使用 MLCC 输出电容器时内部纹波 (斜坡) 的直流偏移。这显著改善了负载调节 (图 7)。TI 的 SWIFT™ TPS53513、TPS 53515 和 TPS53915 转换器均采用 D-CAP3 控制模式。

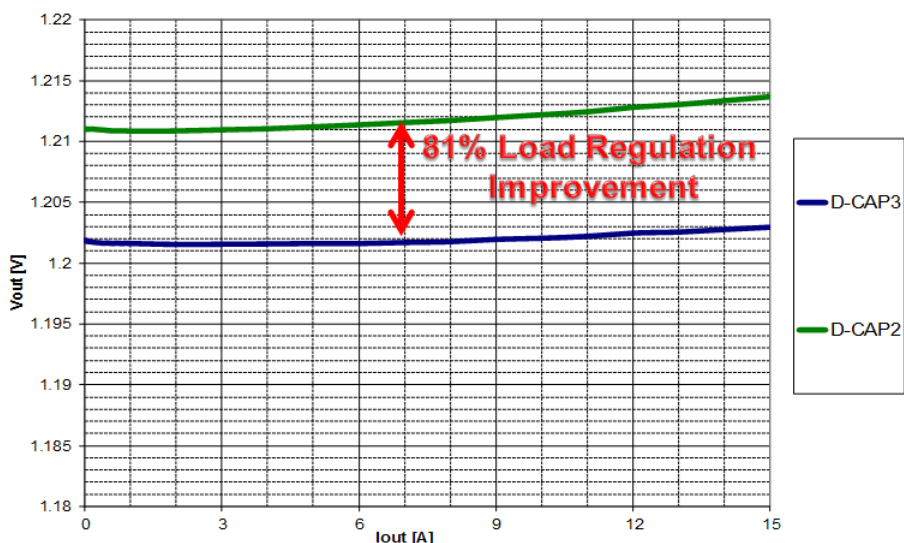
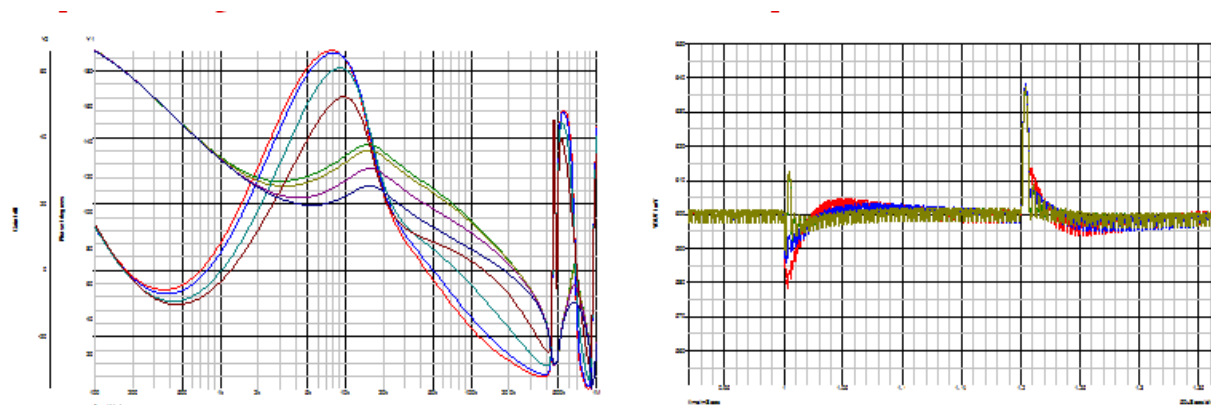


图 7. 负载调节比较：D-CAP2 与 D-CAP3，12Vin、1.2Vout/500KHz

此外，D-CAP3 中的内部纹波 (斜坡) 会根据输出电压、占空比、输出滤波器 (LC) 选择和开关频率进行自适应调整，以提高性能并增强易用性。

通过单个 Rmode 电阻器选择 RC (斜坡) 时间常数，D-CAP3 控制即可实现最佳的时域和频域性能，如下方图 8 所示：



| Vin=12V, Vout=0.6V, Iout=10A,<br>Fsw=600kHz,<br>$\Delta I = 5A$ and $di/dt = 5A/\mu sec$<br>Lout=1 $\mu H$ , 5m $\Omega$<br>Cout = 100 $\mu F$ , 1m $\Omega$ |                   | Crossover<br>Frequency | Phase<br>Margin | Gain at Low<br>Frequency<br>Behavior | Overshoot | Undershoot | Ringback<br>(undershoot<br>recovery) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------|------------|--------------------------------------|
| <u><math>\frac{1}{2} R \times 1 C</math></u>                                                                                                                 | 0.504Meg x 16.5pF | 124kHz                 | 77°             | 18dB                                 | 659mV     | 565mV      | 607mV                                |
| <u>1 R x 1 C</u>                                                                                                                                             | 1.08Meg x 16.5pF  | 181kHz                 | 58°             | 19dB                                 | 660mV     | 579mV      | 604mV                                |
| <u>2 R x 1 C</u>                                                                                                                                             | 2.16Meg x 16.5pF  | 220kHz                 | 33°             | 21dB                                 | 660mV     | 587mV      | 603mV                                |
| <u>4 R x 1 C</u>                                                                                                                                             | 4.32Meg x 16.5pF  | 235kHz                 | 17°             | 25dB                                 | 661mV     | 591mV      | 602mV                                |
| <u>4 R x 1.3 C</u>                                                                                                                                           | 4.32Meg x 21pF    | 235kHz                 | 15°             | 26dB                                 | 660mV     | 592mV      | 602mV                                |

图 8. D-CAP3 RC ( 内部 RC 斜坡 ) 调优 ( Vout=0.6V ) : 优化的频域和时域性能

在您的下一款设计中，借助 TI 采用 D-CAP 控制模式的产品即可降低成本并确保可靠性。观看“[D-CAP3 控制模式降压 FET 转换器](#)”了解更多信息。

## 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