

# 固定频率 DCS-Control: 具有时钟同步功能的快速瞬态响应

Chris Glaser

Senior Member, Technical Staff

## 引言

恒定导通时间 (COT) 控制拓扑的常见缺点是开关频率变化和无法与外部时钟同步。TI 无缝过渡到省电模式的固定频率直接控制 (固定频率 DCS-Control) 拓扑建立在可提供快速瞬态响应的流行 COT DCS-Control 拓扑基础之上, 并增加了一个振荡器, 以实现固定频率操作和可选的时钟同步。这种组合支持既需要快速瞬态响应, 又具有特定噪声或频率要求的应用。

差分遥感、外部控制环补偿和可堆叠性等其他特性支持噪声敏感型应用中大电流处理器对瞬态的苛刻要求, 这些应用包括汽车信息娱乐和高级驾驶辅助系统 (ADAS)、通信设备光学模块、工业测试和测量、医疗以及航空航天和国防。本文概述了固定频率 DCS-Control 拓扑, 讨论了其出色的瞬态响应、恒定和可同步的开关频率、低纹波省电模式以及可实现更大电流的可堆叠性。

## DCS-Control 拓扑概览

图 1 显示了 DCS-Control 拓扑的基本方框图 [1]。输出电压检测 (VOS) 引脚和反馈 (FB) 引脚为控制环路提供输入, 以实现适当的调节。VOS 引脚通过将输出电压直接馈入斜坡, 然后馈入比较器, 使其立即影响工作点, 从而实现拓扑的快速瞬态响应。FB 引脚是一条带宽较低的路径, 可提供高度精确的直流设定调节。在 DCS-Control 中时, VOS 引脚的交流路径和 FB 引脚的直流路径相结合, 可提供精确的输出电压, 并能够快速响应负载瞬态。

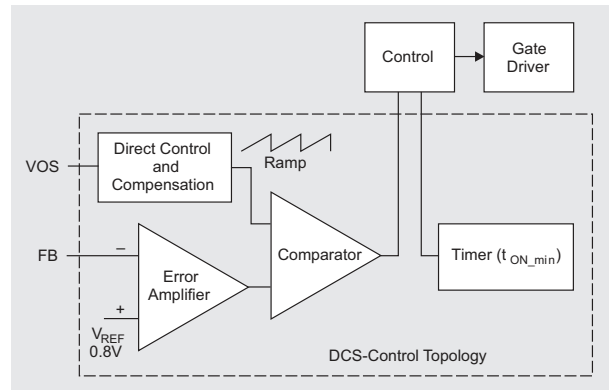


图 1. DCS-Control 拓扑的方框图。

DCS-Control 等 COT 拓扑通过计时器设置导通时间。通过根据输入和输出电压调整此导通时间, 计时器可在脉宽调制 (PWM) 模式下使大多数占空比实现合理的恒定频率运行。方程式 1 显示了一个示例, 其中 416ns 是 2.4MHz 开关频率的周期:

$$t_{ON} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \times 416ns \quad (1)$$

但是, 对于需要在特定频段内外运行的应用来说, 开关频率不够精确。这些应用通常需要使用振荡器设置开关频率, 例如采用电压或电流模式控制时, 某些情况下还需要能够与系统时钟信号同步。参考文献 [2] 提供了 DCS-Control 频率变化的更多示例。

## 固定频率 DCS-Control 拓扑概览

图 2 显示了在 15A TPS62873 降压转换器中实现的固定频率 DCS-Control 拓扑的基本框图。增加振荡器后, 就能以与电压或电流模式控制相同的方式直接设置开关频率 ( $f_{SW}$ )。将振荡器输入加入控制环路还能使开关频率与应用的时钟信号同步。

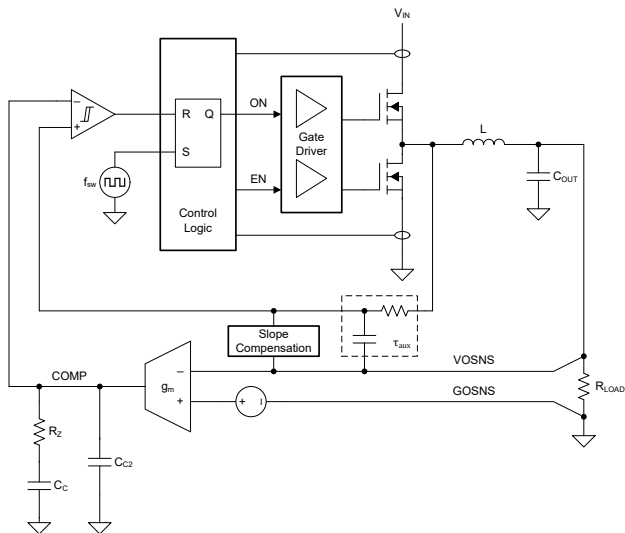


图 2. TPS62873 固定频率 DCS-Control 拓扑框图，包括振荡器、差分遥感、跨导放大器和迟滞比较器。

固定频率 DCS-Control 采用差分遥感技术，通常用于较高电流的器件。该器件调节 VOSNS 引脚和 GOSNS 引脚之间的电压，这两个引脚穿过印刷电路板 (PCB)，直接检测负载上的输出电压。在负载处检测不仅可以克服和补偿 PCB 平面和布线上的直流压降，还可以克服和补偿器件与负载之间的电感产生的延迟。这两个特性对于在整个负载范围内和负载瞬态期间保持非常严格的调节至关重要。

差分遥感信号被馈入跨导放大器 ( $g_m$ )，该放大器将其差值与输出电压设定点进行比较。(为简单起见，图 2 将该设定点显示为与 GOSNS 信号串联的电压源)。COMP 引脚提供该放大器的输出，该输出通过一个 II 类 (一个极点，一个零点) 网络接地进行补偿。

通过这种外部补偿，您可以优化控制环路，以满足任何系统需求 - 从输出电容大、负载瞬态强的系统，一直到输出电容小、体积小、负载瞬态小或无负载瞬态的系统。与 DCS-Control 不同，快速反馈路径会经过该放大器，而不是直接进入比较器，在比较器中选择补偿元件可以增加 (或减少) 增益。如果需要更强的瞬态响应，则需要提高增益并增加输出电容。如果应用中不存在较强的瞬态响应，您可以降低增益并使用很小的输出电容，以实现尽可能小的尺寸。

这种根据应用需求调整瞬态响应的能力可在更恶劣的瞬态条件下实现比以前的 DCS-Control 拓扑更严格的调节，并满足要求苛刻的处理器内核的要求，例如 TI 的 Jacinto™

J7 和 MobileEye 的 EyeQ6 [3-4]。图 3 显示了三个 TPS62876-Q1 降压转换器的堆叠，可提供 46A 的负载瞬态响应，同时将输出电压保持在 0.875V 设定点的  $\pm 2\%$  范围内。

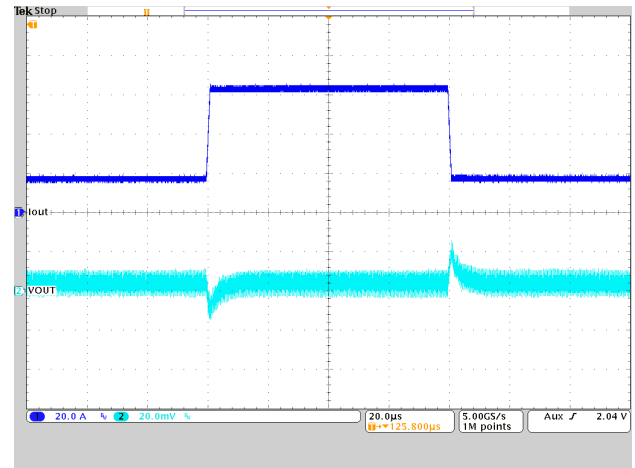


图 3. 固定频率 DCS-Control 的瞬态响应可调整至最严重的负载瞬态，从而提供出色的调节能力。

迟滞比较器会将 COMP 引脚输出与由  $\tau_{aux}$  元件产生的电感器电流副本进行比较，并增加斜率补偿以防止次谐波振荡。比较器的输出与时钟一起驱动设置-复位 (SR) 锁存电路，从而控制栅极驱动器和器件的运行。振荡器可控制开关，使其完全按照开关频率进行。

设置-复位锁存器是控制模块详细操作的简化表示，实施该锁存器是为了保持 DCS-Control 的快速、迟滞特性，从而对负载瞬态做出即时响应。例如，在负载突降瞬态 (输出电压上升) 期间，迟滞比较器的输出优先于时钟信号。转换器会根据需要延长高侧 MOSFET 的关断时间，以尽可能小的过冲使输出电压降下来。与教科书中的峰值电流模式控制相比，这种行为在本质上有所改进，因为教科书中的峰值电流模式控制在每个时钟周期都会切换，即使输出电压过高，也会继续向其增加能量。通过减少输出电压过冲，转换器可显著降低输出电容，这会对电源的成本和尺寸产生重要影响。

## 开关频率变化

除了保持快速瞬态响应 (可通过 COMP 引脚上的外部补偿进一步改善和调整) 外，固定频率 DCS-Control 还可提供具有严格容差规范的固定开关频率。由于开关频率是通过

振荡器直接设置，而不是通过导通计时器间接控制，因此器件专用数据表中对频率容差进行了规定。表 1 和表 2 将使用固定频率 DCS-Control 拓扑的 TPS62876-Q1 的开关频率规格与 DCS-Control TPS62869 降压转换器的典型频率规格进行了比较。

参数	测试条件:	最小值	典型值	最大值	单位
f <sub>sw</sub> 开关频率	f <sub>sw</sub> = 1.5MHz, PWM 运行	1.35	1.5	1.65	MHz
	f <sub>sw</sub> = 2.25MHz, PWM 运行	2.025	2.25	2.475	
	f <sub>sw</sub> = 2.5MHz, PWM 运行	2.25	2.5	2.75	
	f <sub>sw</sub> = 3MHz, PWM 运行	2.7	3	3.3	

表 1. 使用固定频率 DCS-Control 拓扑的 TPS62876-Q1 规定，在整个温度和输入电压范围内，其四个开关频率选项的容差为 ±10%。

参数	测试条件:	最小值	典型值	最大值	单位
f <sub>sw</sub> PWM 开关频率	I <sub>OUT</sub> = 1A, V <sub>OUT</sub> = 0.9V		2.4		MHz

表 2. 使用 DCS-Control 的 TPS62869 只规定了典型开关频率。

图 4 和图 5 比较了应用中开关频率的实际变化与负载电流间的关系。这两款器件都支持省电模式，在负载电流较低时（两幅图的左侧）频率降低。在 PWM 模式下运行（电流较大）时，固定频率 DCS-Control 的开关频率得到精确控制，而 DCS-Control 的开关频率则会随着负载的增加而略有提高。在强制 PWM 模式下（未显示），固定频率 DCS-Control 可在空载时保持恒定频率。

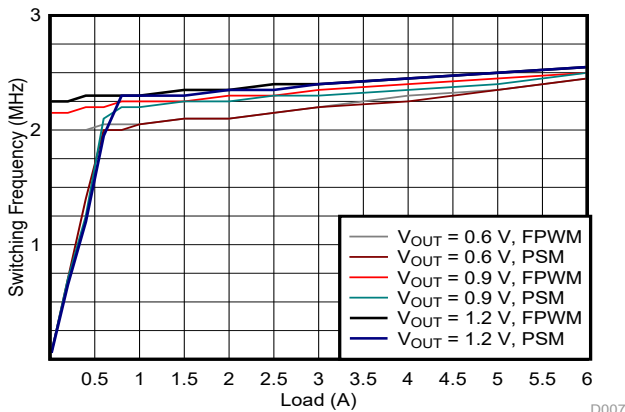


图 4. 采用 DCS-Control 的 TPS62869 的开关频率变化。

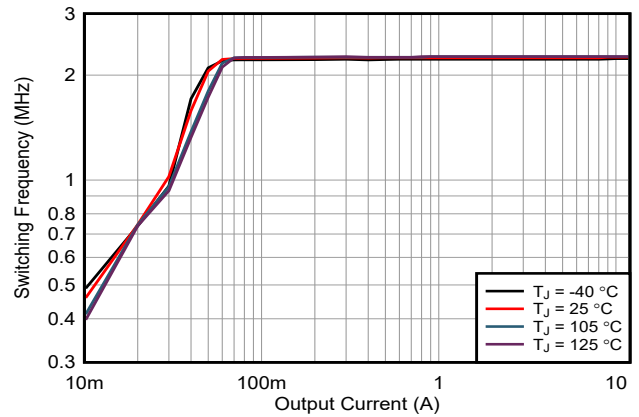


图 5. 采用固定频率 DCS-Control 的 TPSM8287A12 电源模块的开关频率变化。

除省电模式外，还有两种情况开关频率也会偏离振荡器设定的频率：强瞬态负载期间和达到最短导通时间时。在施加大负载时，高侧 MOSFET 的导通时间可能长于整个开关周期；在移除大负载时，高侧 MOSFET 的关断时间可能长于整个开关周期。这两种情况都会导致由于导通或关断时间过长而缺失一个或多个脉冲。

如果达到高侧 MOSFET 的最短导通时间，固定频率 DCS-Control 和 DCS-Control 都会降低开关频率，以满足最短导通时间并维持输出电压调节。这些器件的性能相比某些电流模式器件有所改进，因为电流模式器件会保持频率不变，并升高输出电压，以满足所需的最短导通时间。虽然固定频率 DCS-Control 和 DCS-Control 都以相同的方式降低开关频率 [2]，但固定频率 DCS-Control 达到最短导通时间并降低频率的工作条件较少，因为其最短导通时间更短。例如，TPS62876-Q1 规定其在 5V 输入电压和工作温度范围内的最短导通时间的最大值为 44ns。如此低的最短导通时间值使得汽车、航空航天和国防等领域的低输出电压应用能够在整个系统有时需要的较高频率区域工作。

### 低纹波省电模式

虽然大多数应用都在强制 PWM 模式下运行固定频率 DCS-Control 器件，以便在轻负载时获得更低的输出电压纹波和更好的瞬态响应，但该拓扑也支持省电模式，以提高轻负载时的效率。为了保持目标开关频率，并在较低负载电流下提供较低纹波，固定频率 DCS-Control 在省电模式下缩短了导通时间，而 DCS-Control 则保持导通时间不

变。当电感器电流变得不连续时，这两种拓扑都会进入省电模式，从而产生比 PWM 模式稍高的纹波。

固定频率 DCS-Control 的省电模式不是在导通时间不变的情况下降低频率，而是在保持频率不变的情况下缩短导通时间。与 DCS-Control 相比，缩短导通时间可减少输出能量，从而降低纹波电压。一旦导通时间缩短到最短，跳跃脉冲将进一步降低最轻负载的输出功率。跳跃脉冲也会降低频率。

**图 4 和图 5** 显示了省电模式下频率降低的差异。固定频率 DCS-Control 在负载低于大约 60mA 时降低频率，而 DCS-Control 器件在大约 500mA 时开始降低频率。虽然不同器件和工作条件的这些电流值不尽相同，但固定频率 DCS-Control 器件在负载电流较低时仍能保持开关频率，从而降低纹波。

## 通过堆叠（并联）获得更大（或更小）的负载电流

一方面，每一代处理器内核都需要更高的电流。另一方面，某些应用可能不会使用特定处理器的全部功能，或者可能使用同一处理器系列中相对低端的处理器，从而降低电流要求。无论是要提高还是降低电源的电流能力，都需要采用可堆叠（可并联）解决方案，这样就可以根据电流要求的变化来添加或移除额外的电源相位。

固定频率 DCS-Control 器件支持堆叠。虽然每个器件系列的具体实现细节略有不同，但其特性都包括电流共享、相位交错和接口简化。

电流共享通过 COMP 引脚实现。由于 COMP 引脚本质上是小信号工作点，因此通过在所有堆叠器件之间共享该引脚的信号，固定频率 DCS-Control 通常能够实现高于 10% 的电流共享精度。

相位交错由专用 SYNC\_OUT 引脚实现，该引脚连接到堆栈中下一个器件的 MODE/SYNC 输入引脚。SYNC\_OUT 会自动进行相移，以消除纹波。通过这种简单的菊花链，

堆栈中的所有器件都能以相同的频率运行，而且纹波比单相设计更低。您可以堆叠大量转换器，实现非常好的相位平衡，而无需指定堆栈中的器件数量。

通过 I2C 与堆栈连接时，通信只发生在主要器件上，而不是堆栈中的每个器件上，以便调整输出电压、更改工作模式或读回故障寄存器。与单个器件连接可减少读写次数和需要布线的 PCB 信号数量，从而大大简化通信开销和 PCB 布线。

## 结语

凭借快速的瞬态响应和可堆叠性，固定频率 DCS-Control 可满足新款处理器对负载瞬态和输出电流的苛刻要求，而其固定频率操作和同步功能使其非常适合噪声敏感型应用。汽车 ADAS 和信息娱乐系统、光学模块、工业测试和测量、医疗以及航空航天和国防应用都能从中受益。可调外部控制环路补偿以极小的输出电容支持快速瞬态响应，从而降低电源系统的大小和成本。

## 参考文献

1. 德州仪器 (TI): [高效、低纹波 DCS-Control 提供无缝 PWM/节能转换](#)
2. 德州仪器 (TI): [了解 DCS-Control 拓扑中的频率变化](#)
3. 德州仪器 (TI): [使用 TPS6594133A-Q1 PMIC 和双通道 HCPS 转换器为适用于隔离式电源组的 Jacinto J7 SoC 系列器件供电](#)
4. 德州仪器 (TI): [MobileyeEyeQ6L - 半离散电源树](#)
5. Priess, Canan, “[如何为 ADAS 处理器提供超过 100A 的电流](#)”。TI E2E™ 设计支持论坛技术文章，2023 年 6 月 6 日。

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 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