

Application Note

理解 LMR33620/30 和 LMR36006/15 的模式转换



Sam Jaffe and Katelyn Wiggenghorn

摘要

现代 DC/DC 转换器利用各种运行模式来优化宽输入电压范围和输出负载电流范围内的效率。例如，为提升轻载效率，现代 DC/DC 转换器采用脉冲频率调制 (PFM)，并且随着输出负载电流增加，运行模式会切换到强制脉冲宽度调制 (FPWM)。本应用手册讨论了 LMR33620/30 和 LMR36006/15 的模式转换和预期开关波形。这些先进的转换器利用 TI 的一些高级特性来确定改变模式的理想时间。本应用手册中的内容不仅介绍了转换器的预期运行情况，还介绍了这些运行情况背后的逻辑。这些知识可帮助电源设计人员充分利用这些特性来优化其设计。有关此内容的简要视频版本，请观看培训系列中的第二个视频：[DC/DC 降压转换器：所有这些特性都有什么含义？](#)如需使用实用工具根据规格计算运行模式和预期频率，请查看产品文件夹中的[计算器](#)。

内容

1 简介.....	3
2 典型降压转换器运行.....	3
2.1 CCM：连续导通模式.....	4
2.2 DCM：不连续导通模式.....	4
2.3 PFM：脉冲频率调制.....	4
2.4 电流限制.....	4
3 COMP 曲线.....	6
4 PFM 和轻载运行.....	7
5 自动频率折叠.....	9
6 时钟控制.....	10
7 重载折叠、电流限制和断续.....	11
8 总结.....	13
9 参考资料.....	13
10 修订历史记录.....	13

插图清单

图 2-1. 简化降压转换器原理图.....	3
图 2-2. 降压转换器开关波形.....	3
图 2-3. DCM 与 CCM：电感电流波形.....	4
图 2-4. 恒定频率与脉冲频率调制：电感电流波形.....	4
图 3-1. LMR33630 方框图.....	6
图 3-2. COMP 曲线.....	7
图 4-1. COMP 曲线：PFM 运行.....	8
图 4-2. PFM 运行：电感电流.....	8
图 5-1. COMP 曲线：自动折叠运行.....	9
图 5-2. 自动折返运行：电感器电流波形.....	9
图 6-1. COMP 曲线：时钟控制运行.....	10
图 6-2. 时钟控制运行：电感电流波形.....	11
图 7-1. COMP 曲线：电流限制运行.....	11
图 7-2. 电流限制运行：电感电流波形.....	12
图 7-3. 断续运行.....	12

表格清单

表 3-1. LMR36006/15 和 LMR33630/20 的相关值.....7

商标

SIMPLE SWITCHER™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

降压转换器在电力电子市场发挥着至关重要的作用。从个人电子产品到工业应用再到汽车，每种应用都需要电源才能运行。降压转换器为各种电源转换应用提供了高效、小尺寸、低成本的解决方案。降压转换器技术已经进步，在提升功率密度、提高效率、降低噪声的同时进行了其他改进，全面优化这类系统的整体性能。最新的降压技术是材料改进的结果——更低 R_{DS-ON} 的 FET、热优化封装，以及改进的控制技术，如轻载运行模式和过流检测。本应用报告深入探讨了后者。[LMR33620/30](#) 和 [LMR36006/15](#) 采用 TI 最先进的控制技术来提升效率、保护水平和整体性能。本应用手册解释了这些特性如何改进系统以及 IC 级运行逻辑，从而使电源设计人员能够充分利用 TI 技术创建优化的最先进系统。

2 典型降压转换器运行

降压转换器（或控制器）接收输入电压并将其高效转换为较低的输出电压。这是通过以下开关方法实现的：以高频率（几百 kHz 到几 MHz）以及与 V_{SW} 与 V_{IN} 之比成比例的占空比，将 V_{SW} 连接到 V_{IN} ，然后将 V_{SW} 连接到 GND，再将 V_{SW} 连接到 V_{IN} 。LC 低通滤波器将此开关波形转换为稳定的直流输出。有关典型降压转换器的简化版原理图，请参阅图 2-1。

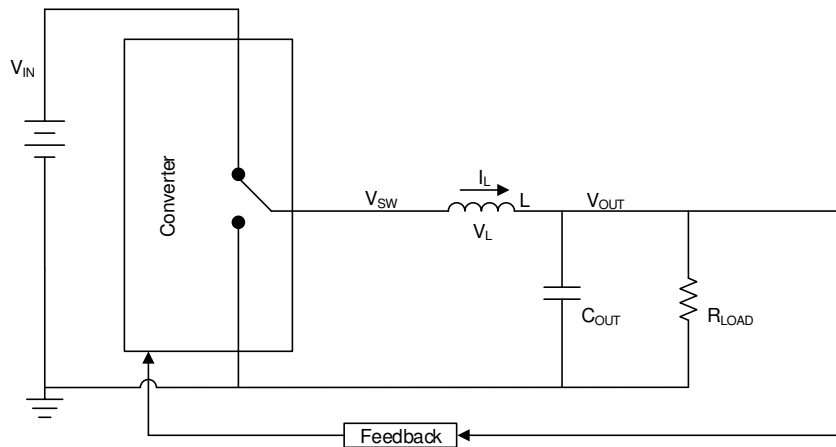


图 2-1. 简化降压转换器原理图

V_{SW} 连接到 V_{IN} （ V_{SW} 切换为高电平）。此时，电感电流以与 $V_{IN} - V_{OUT}$ 和电感 L 成比例的速率线性斜升，如图 2-2 所示。

V_{SW} 连接到 GND（ V_{SW} 切换为低电平）。此时，电感电流以与 $V_{IN} - V_{OUT}$ 和电感 L 成比例的速率线性斜降，如图 2-2 所示。

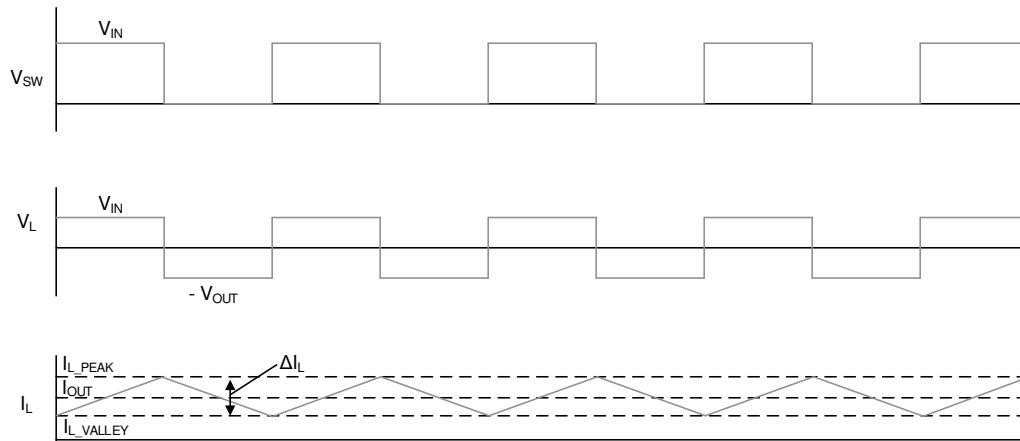


图 2-2. 降压转换器开关波形

2.1 CCM : 连续导通模式

当电感电流连续时, 转换器在 CCM 下运行 — 意味着电流始终在斜升或斜降。这是转换器处于中到重载时的正常运行状态。平均电感电流 (I_{L_AVG}) 等于输出电流 (I_{OUT})。如果电感器电流纹波振幅 $\Delta I_{L/2}$ 小于 I_{OUT} , 瞬时电感电流 (I_L) 永远不会达到零。

但是, 如果同步转换器中的输出负载减轻, I_L 可以在电感纹波的谷值处降至 0A 或者甚至更低。这仍然是 CCM 模式, 因为电感电流始终在斜变, 但这种运行模式会造成浪费。任何负电感电流都必须在开关周期的后期被正电流抵消, 并且电感器必须具有直流电阻, 因此任何不必要的电流通过电感器直流电阻都会耗散不必要的功率。这种功率浪费问题推动了不连续导通模式的发展。

2.2 DCM : 不连续导通模式

DCM 在电感电流达到零时简单地关断两个 FET (图 2-1 中的开关)。 V_{SW} 未连接到 V_{IN} 或 GND — 它保持悬空。这意味着转换器可以等到下一个开关周期再重新导通 V_{SW} 。图 2-3 展示了相同负载下 CCM (上方波形) 与 DCM (下方波形) 之间的波形比较。

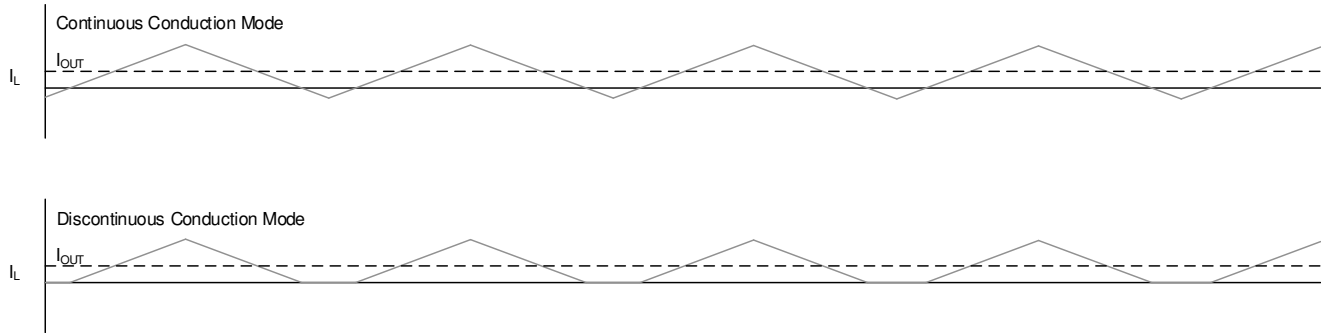


图 2-3. DCM 与 CCM : 电感电流波形

2.3 PFM : 脉冲频率调制

PFM 的开发旨在通过在极轻负载情况下降低开关频率来进一步提升轻载效率。这可以提升轻载效率, 因为每个开关周期都需要以开关损耗形式消耗能量, 而更少的开关次数意味着更少的开关损耗。PFM 还可防止输出电压升高到所需调节点以上。降压转换器具有最小导通时间, 这意味着每个开关周期都会向输出端传递一定的能量。空载时的恒定频率可能导致该电压升高到高于所需值。降低频率可消除这种情况发生的可能性。图 2-4 展示了不同负载下固定频率 DCM (上方波形) 与降频 PFM (下方波形) 之间的波形比较。

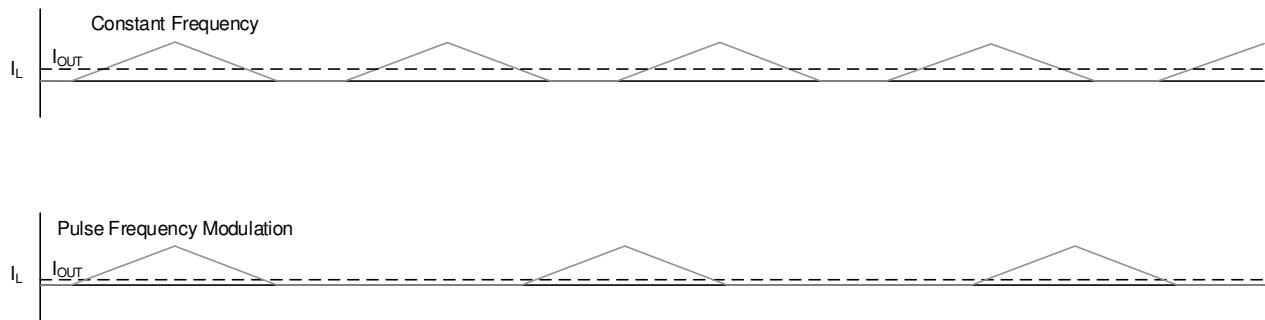


图 2-4. 恒定频率与脉冲频率调制 : 电感电流波形

2.4 电流限制

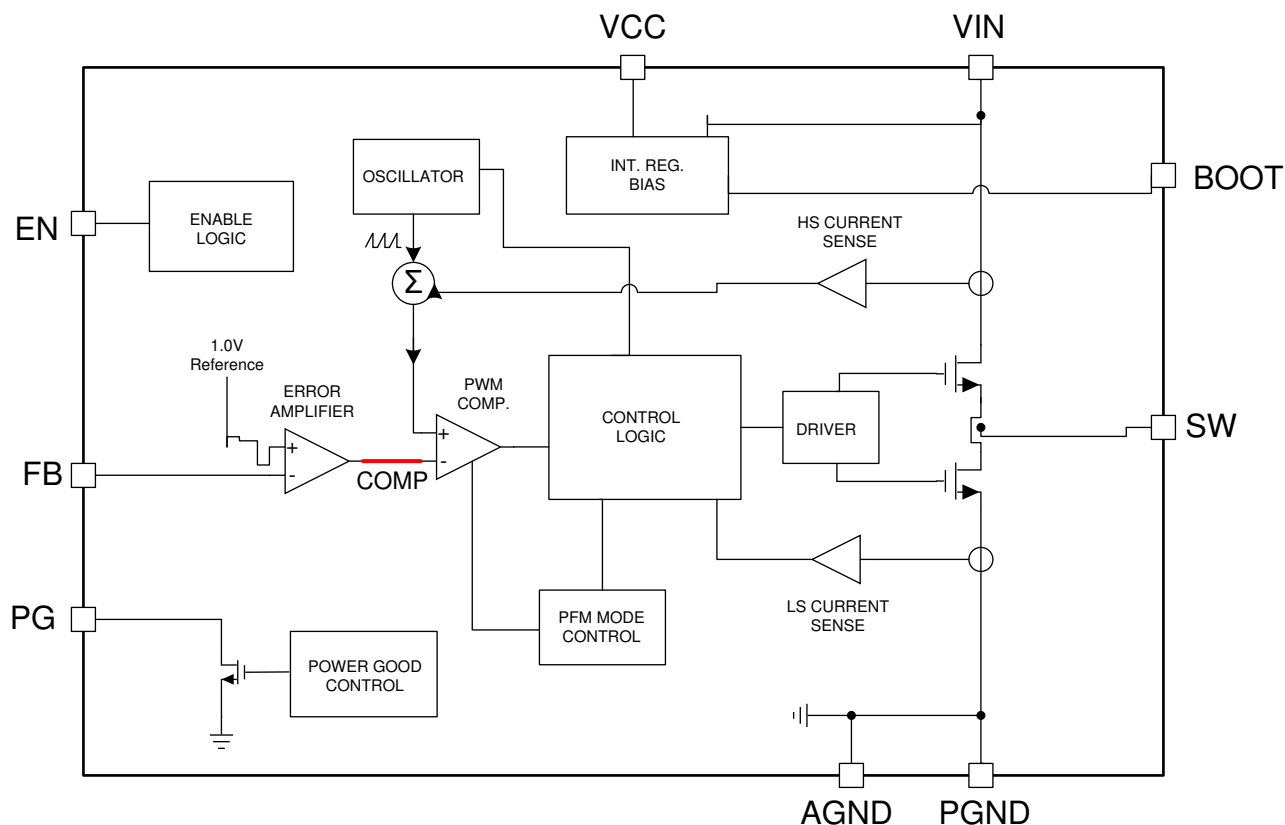
降压转换器通常还会采用称为电流限制的特性。过载状况和/或短路情况可能从 V_{OUT} 抽取过量电流。如果不检测并加以防护, 这种过载状况可能导致 IC 过热并造成损坏。一些 IC 只会关断, 另一些 IC 则会针对足够重的负载限制电流。

[LMR33620/30](#) 和 [LMR36006/15](#) 利用这些特性并进行了进一步优化。本应用报告的后续章节将解释对每种模式的改进。要理解此运行模式的基础，必须首先理解[节 3](#)中解释的补偿曲线。

[图 3-2](#) 显示了[图 3-2](#)中参考的 COMP 曲线。[表 3-1](#) 显示了每个器件型号的不同关注点。

3 COMP 曲线

COMP 信号是一种内部控制逻辑信号，表示峰值和谷值电感电流命令。COMP 信号是误差放大器的输出，如图 3-1 所示。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 3-1. LMR33630 方框图

最终，可利用 COMP 信号来理解运行模式和相应的开关频率。本节解释 IC 如何使用 COMP 曲线 (图 3-2) 来确定运行模式。如需更具实用性的学习方法，请查看[频率预测工具](#) (LMR33620/30/Q、LMR36006/15/Q)。该工具将运行情况作为输入 (V_{IN} 、 V_{OUT} 、 I_{OUT} 、L、器件型号、所选频率)，并计算这些情况下的预期运行模式和开关频率。用户可以修改每个参数以查看效果。

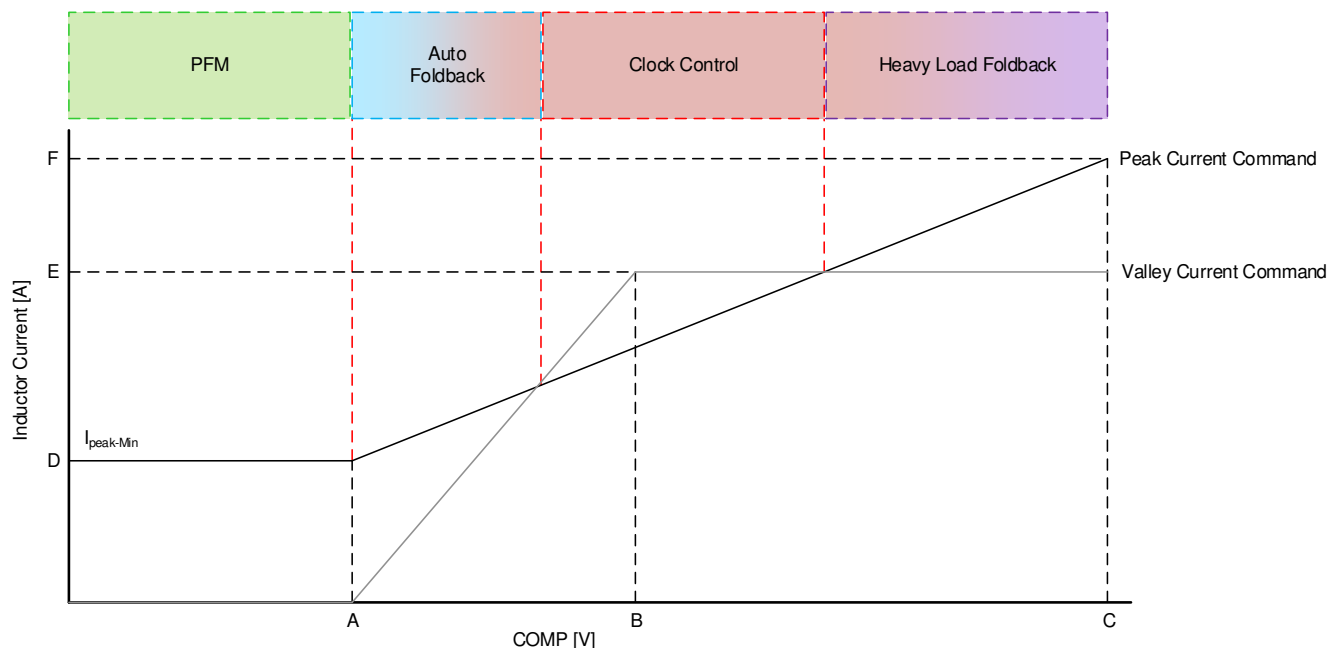


图 3-2. COMP 曲线

表 3-1. LMR36006/15 和 LMR33630/20 的相关值

器件	A	B	C	D	E	F
LMR36006	0.21	0.55	1	0.21	0.8	1
LMR36006-Q1	0.21	0.55	1	0.21	0.8	1
LMR36015	0.2	0.55	1	0.48	1.8	2.4
LMR36015-Q1	0.2	0.55	1	0.48	1.8	2.4
LMR33620	0.19	0.55	1	0.65	2.45	3.5
LMR33620-Q1	0.19	0.55	1	0.65	2.45	3.5
LMR33630	0.18	0.55	1	0.8	3.5	4.5
LMR33630-Q1	0.18	0.55	1	0.8	3.5	4.5

COMP 曲线说明了转换器在正常运行情况下何时切换到高低电平的逻辑。

Y 轴显示电感电流。想象转换器位于该图上的某一点。电感电流随负载斜升和斜降时，该点相应地上升和下降。

X 轴显示 COMP 电压，该电压与输出电流成比例。图上的工作点随负载变重和变轻分别向右和向左移动。

COMP 曲线上的两条线是峰值电流命令和谷值电流命令。

峰值电流命令：电感电流（在正常运行期间）永远不会超过峰值电流命令。当电感电流达到峰值电流命令时， V_{SW} 变为低电平。这会导致 I_L 斜降。

谷值电流命令：电感电流总是会斜降至谷值电流命令或以下。在 I_L 达到或超过谷值电流命令之前， V_{SW} 永远不会变为高电平。当电感电流达到谷值电流命令且时钟准备好新的开关周期时， V_{SW} 变为高电平。

转换器以用户选择的特定频率运行，例如 400kHz、2.1MHz，具体取决于所选器件型号。这一所选频率是转换器开关切换的最大频率。COMP 曲线电流命令线和运行逻辑决定转换器是以此频率运行还是折叠（降低）开关频率。折叠会降低功耗，从而提升效率。COMP 曲线经过专门设计，可在所需运行状态条件下折叠频率，这些条件可以轻松预测并用于提升系统效率。

4 PFM 和轻载运行

LMR33620/30 和 LMR36006/15 中的 PFM 属于轻载情况，包括 DCM（尽管不是在设定的所需频率下的 DCM）和典型的 PFM 频率折叠。这些特性允许转换器以非常低的开关频率工作，从而大幅降低运行输入电流。

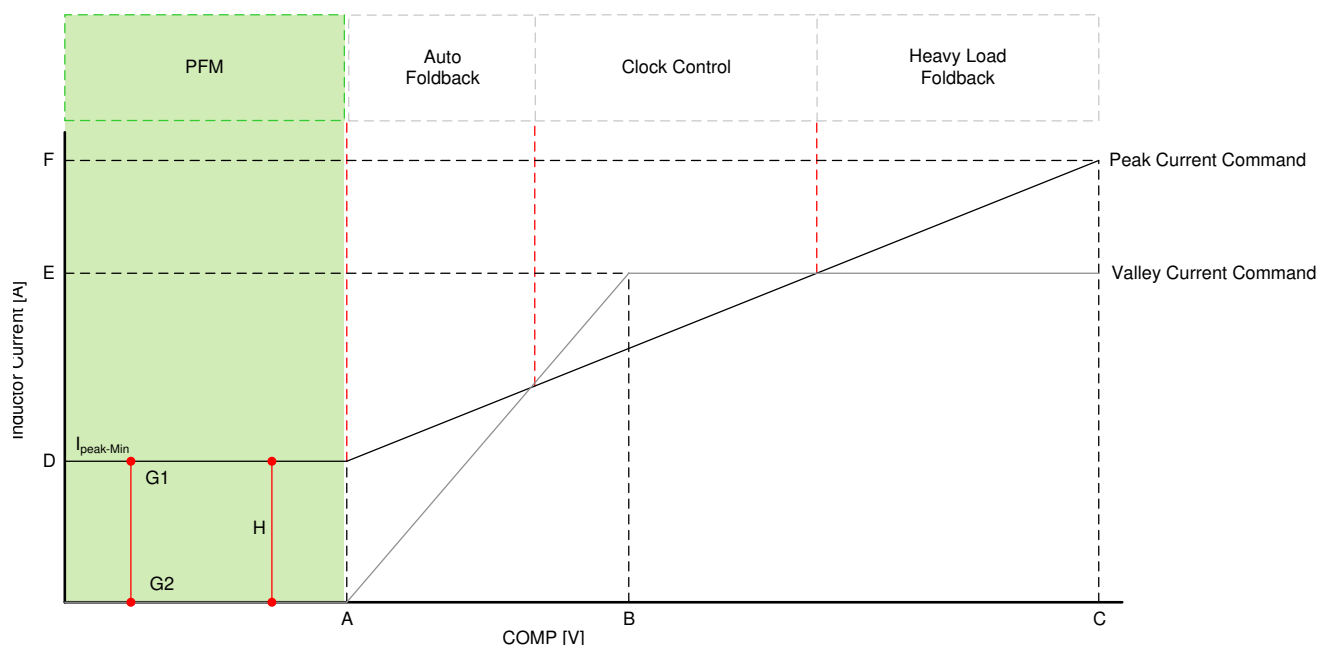


图 4-1. COMP 曲线：PFM 运行

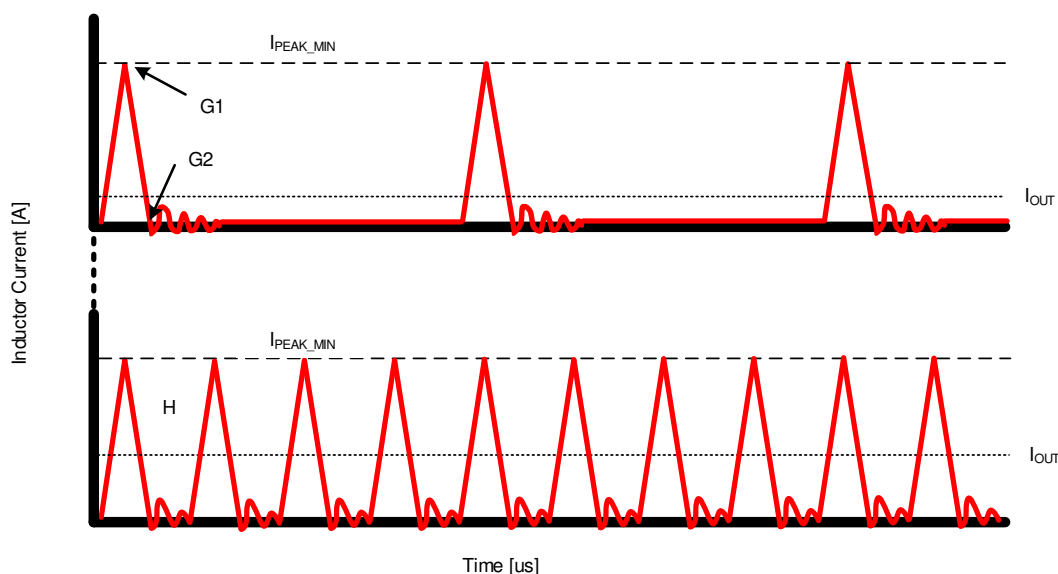


图 4-2. PFM 运行：电感电流

图 4-1 突出显示了 COMP 曲线的 PFM 区域。图 4-2 显示了与图 4-1 相同的工作点的时域电感电流波形。图 4-1 和图 4-2 上的标记 G1 和 G2 显示了极轻负载运行情况。电感电流斜升至 G1，达到峰值电流命令 (I_{PEAK_MIN})，然后斜降至 G2 (零安培)。电感电流达到零，然后转换器关断两个 FET，使 V_{SW} 保持悬空。此时电感两端存在电压，因为 FET 的寄生电容刚由低侧 FET 放电 (V_{SW} 为 0V)，而 V_{OUT} 为非零 V_{OUT} 。该电压会将一些反向电流推入电感器，使其以电感器 L 和 FET 寄生电容的谐振频率振铃 (参见 G2 的后方)。这种振铃通常无害，除非它处于 EMI 测量中的相关频率上。转换器监测反馈电压，直到电压降至足够低，然后重新导通 V_{SW} 。这就是控制 PFM 频率的方式。

I_{OUT} 增加意味着转换器在 X 轴上运行位置更靠右。脉冲频率随负载电流增加而增加，如图 4-1 和图 4-2 上的标记 H 所示。随着 I_{OUT} 增加， V_{OUT} 在脉冲之间下降得更快，从而导致更高的开关频率。足够高的 I_{OUT} 会导致电感电

流斜降的结束与电感电流斜升的开始一致。这时进入 CCM 模式，使转换器进入下一个运行区域 — 自动频率折叠。

请注意，PFM 和自动频率折叠并不总是最优选择，例如在始终需要固定开关频率的系统中。**LMR36006/15** 有一个版本可为这些场合启用强制脉宽调制 (FPWM)。该器件始终以所选频率运行，不使用 PFM 或自动模式。FPWM 运行模式在轻载到中等轻载下会降低效率，但在某些系统中这种牺牲可能值得。

5 自动频率折叠

自动频率折叠是 **LMR33620/30** 和 **LMR36006/15** 特有的特性。该区域作为从 PFM 到固定频率 CCM 的平滑过渡区。转换器在中等轻载条件下折叠频率以提升效率，如图 5-1 和图 5-2 所示。

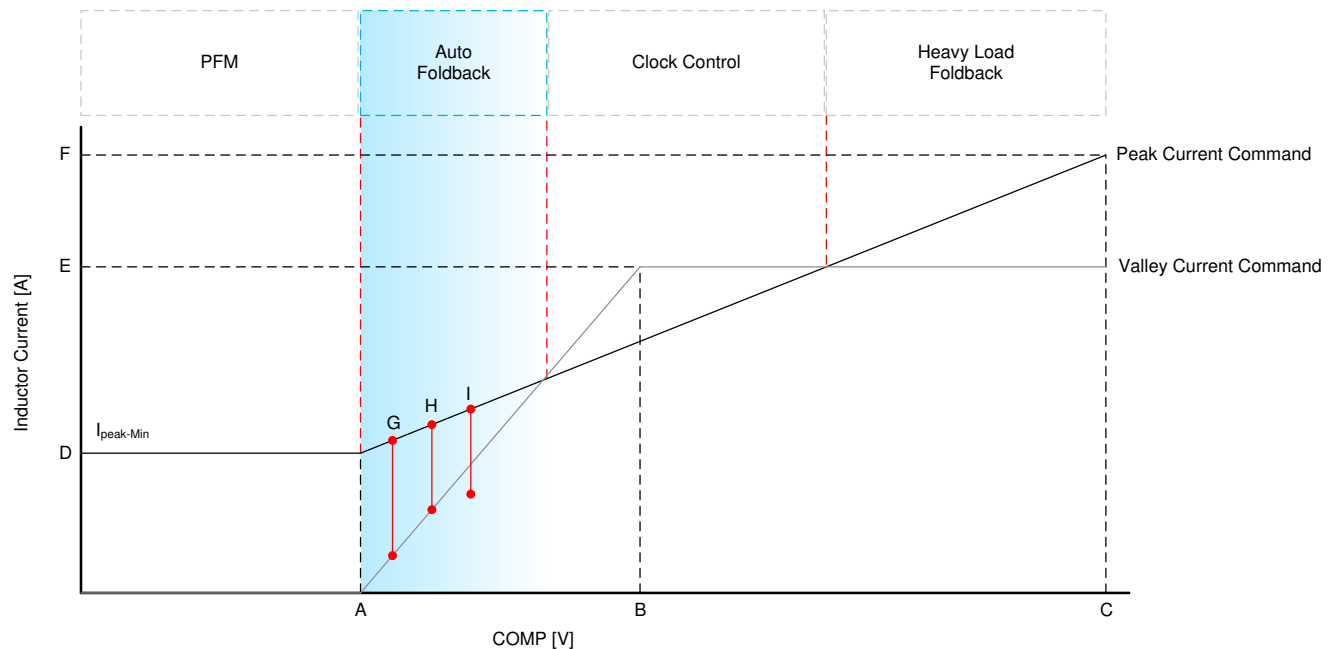


图 5-1. COMP 曲线：自动折叠运行

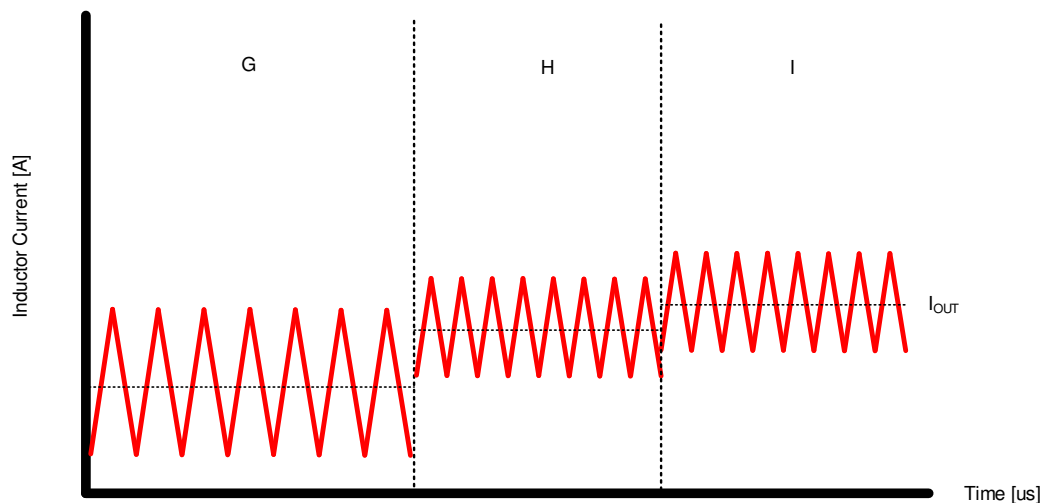


图 5-2. 自动折返运行：电感器电流波形

区域 G 显示了中等轻载情况。转换器刚刚退出 PFM，仍需要电感电流一直斜降到谷值电流命令，然后才重新导通开关。开关频率的这种降低会带来比更高频率下更高的效率。通常，效率曲线在 PFM/DCM 与 PWM/CCM 之间的切换处会出现效率下降，但这种自动折叠在该区域保持了良好的效率。

区域 H 显示了转换器开始以用户选择的固定频率运行的点位。随着输出电流增加，谷值电流命令线趋近峰值电流命令线，这意味着频率随输出电流增加而增加。最终，开关频率达到用户选择的频率，此时电感电流在时钟触发 SW 重新导通之前自然斜降到谷值电流命令以下。之前的区域会检测到时钟信号，但无法将 V_{SW} 切换为高电平，因为 I_L 尚未达到谷值电流命令。现在电感电流已达到/超过谷值电流命令，因此 V_{SW} 重新导通的时机由时钟决定。不同设计具有不同的运行情况（ V_{IN} 、 V_{OUT} 、 L 、开关频率），这意味着此自动折叠达到固定频率的点位对于每种独特情况都是不同的。本应用报告帮助设计人员理解这些运行模式转换点的情况。

区域 I 显示了自动模式下该固定频率区域的延续。电感电流波形不会改变形状或频率；它仅随负载增加而向上移动。这本质上是提前进入时钟控制，因此对应图 5-2 中的淡蓝色区域。

6 时钟控制

时钟控制是中等负载和重载下的标准固定频率 CCM 运行模式。图 6-1 和图 6-2 显示了预期的运行情况。随着 I_{OUT} 增加，电感电流波形向上移动。这是几乎所有降压转换器中的典型行为。

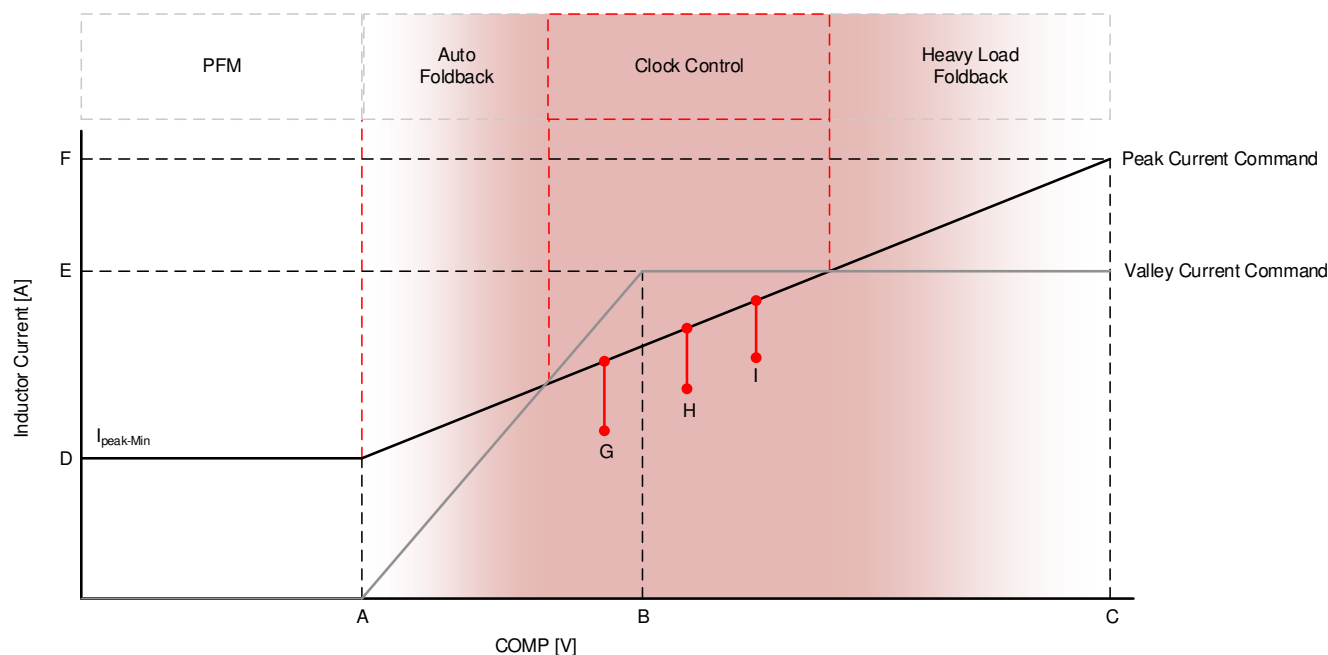


图 6-1. COMP 曲线：时钟控制运行

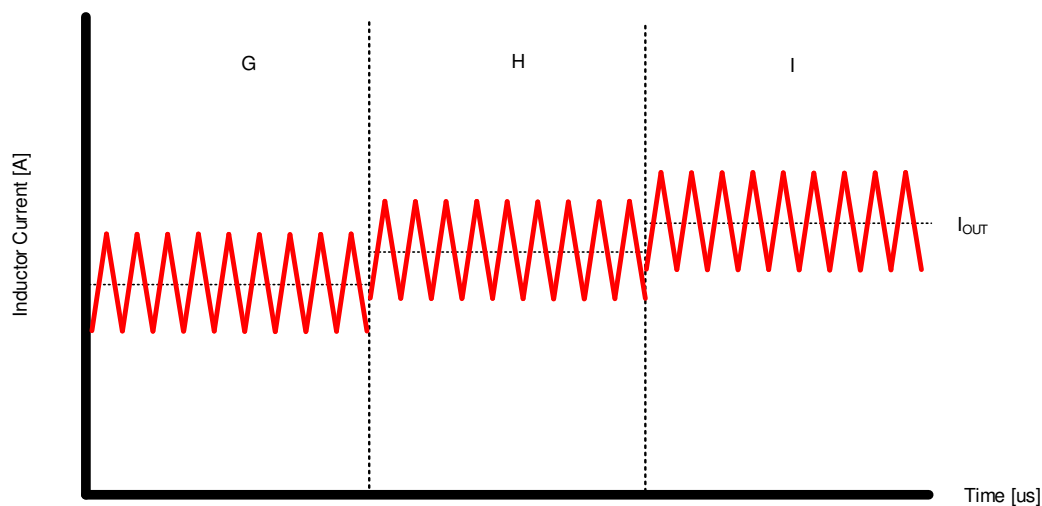


图 6-2. 时钟控制运行：电感电流波形

7 重载折叠、电流限制和断续

大多数现代转换器都实现了电流限制保护。[LMR33620/30](#) 和 [LMR36006/15](#) 采用先进控制方案来确定如何开关，以防止电流失控以及损坏自身和其他元件，并决定如何处理过载和短路情况。

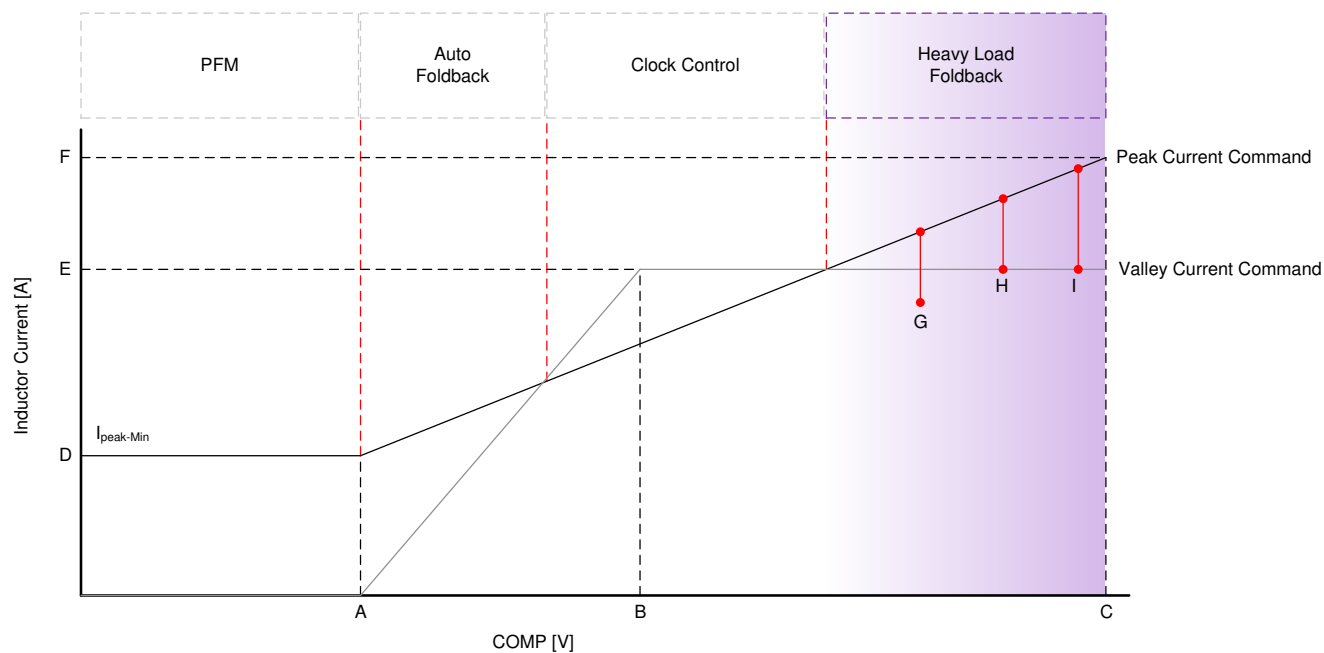


图 7-1. COMP 曲线：电流限制运行

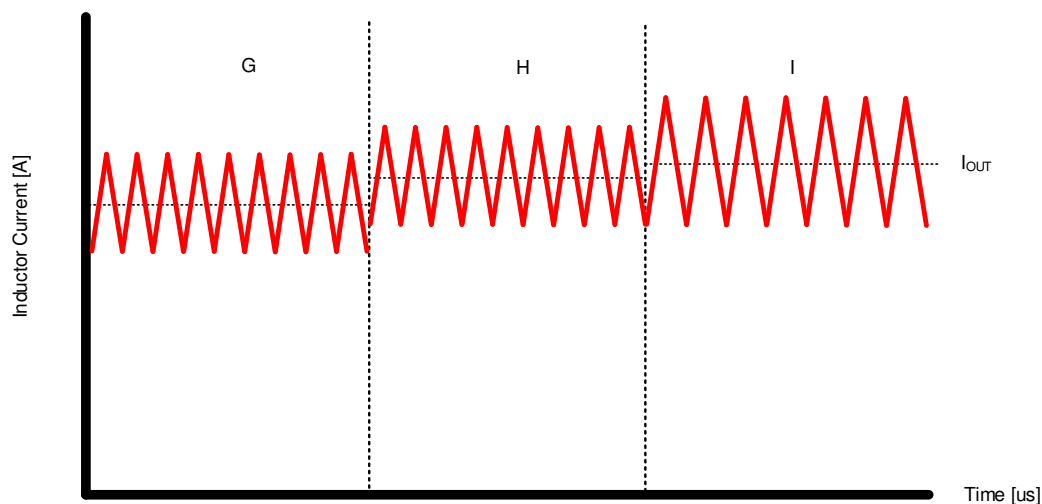


图 7-2. 电流限制运行：电感电流波形

COMP 曲线显示了针对过流情况的第一道防线，如图 7-1 和图 7-2 所示。谷值电流命令在足够高的输出电流下重新发挥作用。区域 G 显示了进入重载折叠区域的正常运行。区域 H 显示了转换器从正常运行转换到主动折叠频率的点位。区域 I 显示了转换器如何要求电感电流下降到谷值电流限制值。这降低了开关频率，并确保电流不会升得太高。通过降低平均输出电流，该峰值电流命令可防止电感电流失控或电流失控并导致电感器饱和。谷值电流命令可确保电流永远不会超过特定值。

第二道防线是峰值电流限制。COMP 电压钳位在 1V。这意味着即使负载需要，输出电流也会停止上升。例如，LMR33630-Q1 在 $V_{COMP} = 1V$ 时具有 4.5A 的峰值电流命令值和 3.5A 的谷值电流命令值。最大负载下的电感电流在这两条命令线之间斜变，意味着输出电流被钳位在 4A (3.5A 和 4.5A 的平均值)。当负载需要的电流超过转换器可提供的电流时，输出电压开始下降。输出电压下降过多，转换器进入打嗝模式。

针对过载和短路情况的第三道防线是打嗝模式。打嗝模式将转换器关断约几十毫秒（参见 LMR33630-Q1 数据表），然后重新导通并检查故障是否已消除，如图 7-3 所示。如果故障仍然存在，转换器再次进入打嗝模式，再等待几十毫秒并继续尝试，直到故障消除。故障消除后，转换器恢复正常运行。当输出电压下降至设计值的 40% 或以下时触发打嗝模式（具体请参阅 LMR33630-Q1 数据表）。打嗝模式发生在短路情况或非常重的负载情况下。打嗝模式使转换器使用的能量比在此类情况下持续开关的转换器显著更少。打嗝模式保护使转换器在短路情况下保持低温，不会浪费能量尝试调节。

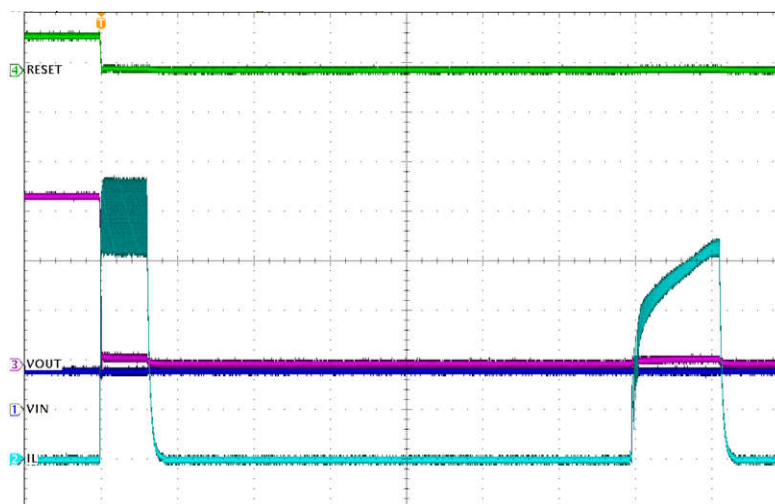


图 7-3. 断续运行

8 总结

LMR33620/30 和 LMR36006/15 是数十年降压控制架构研究的结晶。这些器件不仅包含使能、内部 UVLO、电源正常等典型特性，还使用了先进 PFM、最先进的自动折叠以及高实用性的电流限制特性组合。这些器件可用于设计先进的电源解决方案。有关 LMR36006、LMR36015、LMR33620 和 LMR33630 的产品数据表和电源参考设计示例，请参阅 节 9 中的参考资料。

9 参考资料

- 德州仪器 (TI), [LMR33630 SIMPLE SWITCHER™ 3.8V 至 36V、3A 同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMR33630-Q1 SIMPLE SWITCHER™ 3.8V 至 36V、3A 同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMR33620 SIMPLE SWITCHER™ 3.8V 至 36V、2A 同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMR33620-Q1 SIMPLE SWITCHER™ 3.8V 至 36V、2A 同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMR36015 4.2V 至 60V、1.5A 超小型同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMR36015-Q1 4.2V 至 60V、1.5A 超小型同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMR36006 4.2V 至 60V、0.6A 超小型同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMR36006-Q1 4.2V 至 60V、0.6A 超小型同步降压转换器](#)
- 德州仪器 (TI), [适用于现场变送器的两级电源参考设计](#)
- 德州仪器 (TI), [适用于空间受限的工业传感器的宽输入电压电源参考设计](#)
- 德州仪器 (TI), [针对方案尺寸和低噪声优化的汽车 ADAS 摄像头电源参考设计](#)
- 德州仪器 (TI), [适用于伺服驱动器的紧凑高效 24V 输入辅助电源参考设计](#)
- 德州仪器 (TI), [降压转换器特性简介：UVLO、使能、软启动、电源良好](#)
- 德州仪器 (TI), [降压转换器简介：了解模式转换](#)
- 德州仪器 (TI), [降压转换器简介：最小导通时间和最小关断时间运行](#)
- 德州仪器 (TI), [降压转换器简介：了解静态电流规格](#)

10 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (April 2019) to Revision A (October 2026)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1

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