参考文献

Application Note

*适用于模拟输出模块的双极 **Fly-Buck-Boost** 解决方案*

Preeti Udapudi, Juergen Schneider

摘要

本应用简报介绍了一种可用于 PLC（可编程逻辑控制器）模拟输出模块的双极（分离轨）±15V 和 125mA 输出功率设计。该设计的输入电压范围为 16V 至 35V，可满足 PLC 应用中常见的标准 24V 电压轨需求。该设计选择了一种 Fly-Buck-Boost (FBB) 拓扑，该拓扑使用单个直流/直流转换器驱动一个现成的 1:1 耦合电感器。该选择可确保正输出和负输出的开关频率相同，以避免拍频并支持宽输入电压范围。由于工作频率为 1MHz，因此可以使用小型耦合电感器并提供约 40mVp-p 的低输出纹波电压。所选的 LMR36506RFRPER 强制 PWM 同步降压转换器可确保正负输出电源轨在对称以及非对称负载条件下产生精确的输出电压。

内容

1 引言.....2
1.1 拓扑结构选择.....2
1.2 从降压转换器到 Fly-Buck-Boost 转换器.....2
2 Fly-Buck-Boost 转换器的具体实现.....3
2.1 原理图.....4
2.2 物料清单.....4
3 测试结果.....6
3.1 启动行为.....6
3.2 系统环路稳定性.....6
3.3 热行为.....7
3.4 VOUT 纹波和 SW 节点波形.....7
3.5 效率数据.....8
3.6 负载调整率.....9
4 总结.....10
5 参考资料.....10

插图清单

图 1-1. 降压转换器与 Fly-Buck-Boost 转换器.....3
图 2-1. 分离轨 Fly-Buck-Boost 拓扑.....4
图 3-1. Fly-Buck-Boost 拓扑的启动行为.....6
图 3-2. 系统环路稳定性.....6
图 3-3. Vin 为 16V 且两个电源轨上的负载为 175mA 时的热行为.....7
图 3-4. Vin 为 35V 且两个电源轨上的负载为 250mA 时的热行为.....7
图 3-5. Vin 为 16V 且两个电源轨的负载为 125mA 时的 VOUT 纹波和 SW 节点波形.....7
图 3-6. Vin 为 35V 且两个电源轨的负载为 125mA 时的 VOUT 纹波和 SW 节点波形.....7
图 3-7. 平衡负载条件下效率与输出电流间的关系.....8
图 3-8. Neg IOUT 设置为 1mA 且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率.....8
图 3-9. Pos IOUT 设置为 1mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率.....8
图 3-10. Neg IOUT 设置为 150mA 且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率.....9
图 3-11. Pos IOUT 设置为 150mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率.....9
图 3-12. 平衡负载条件下输出电压与输出电流间的关系.....9
图 3-13. Neg IOUT 设置为 1mA 且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率.....10
图 3-14. Pos IOUT 设置为 1mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率.....10
图 3-15. Neg IOUT 设置为 150mA 并且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率.....10
图 3-16. Pos IOUT 设置为 150mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率.....10

English Document: SNVAA84
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

表格清单

表 2-1. 物料清单.....4

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

1.1 拓扑结构选择

多种拓扑和设计可用于从正输入电压 (VIN) 提供正电压 (Pos VOUT) 轨和负电压 (Neg VOUT) 轨。例如，既有包含升压转换器和反相降压/升压转换器的专用器件（TPS65130、TPS65131 和 TPS65133）、包含升压或 LDO 和负电荷泵的器件（TPS65132 和 LM27762），也有单电感器多输出分离轨转换器 (TPS65135)。除了这些器件之外，设计人员还可以从多种拓扑和通常用于隔离式电源转换的相关器件中进行选择。[1] 这些器件也用于非隔离式应用。开环推挽式（SN6501、SN6505、SN6507）或 LLC (UCC25800) 器件属于此类别以及初级侧调节反激式器件。[2] 此外，在 Fly-Buck 或 Fly-Buck-Boost 拓扑中使用降压转换器也是一种可能的解决方案。

后两种器件的优势是可以从庞大的降压转换器产品系列中选择器件，并且可用于具有宽 VIN 容差范围的应用。多家不同电感器供应商提供的一系列现成耦合电感器也支持使用这些器件。这些现成电感器中提供了大量针对 1:1 匝数比的电感器产品，因而支持直接选择电感器，但也会导致在所需的占空比设计方面存在特定限制。

这两种拓扑都会生成稳压良好的非隔离式初级输出电压；其中，对于 Fly-Buck，会生成正输出，而对于 Fly-Buck-Boost，则会生成负输出。次级输出电压通常是隔离式输出电压，其*跟随*初级侧电压。到次级侧的能量传输发生在开关周期的关断时间内，并会导致所需的占空比小于 50%；剩余 50% 以上的周期时间可用于将能量传输到次级侧。考虑到最好使用 1:1 耦合电感器，当 VINmin > 2×VOUT 时，Fly-Buck 可以满足此要求，而当 VINmin > VOUT 时，Fly-Buck-Boost 可以满足此要求。根据这些注意事项，Fly-Buck 需要最低 30V 的 VIN 才能生成 ±15V 的电压，而 Fly-Buck-Boost 能够在最低 15V 的 VIN 下工作。

1.2 从降压转换器到 Fly-Buck-Boost 转换器

有关如何在 Fly-Buck-Boost 拓扑中使用降压转换器的基础知识，请参阅图 1-1。此图左侧展示了标准降压转换器，而右侧展示了如何在 Fly-Buck-Boost 拓扑中使用标准降压转换器。

为了实现此设计，降压转换器首先要转换为反相降压/升压拓扑。红色框展示了所需的修改。第一步需要互换降压转换器输出端的 VOUT 和 GND 标签或符号。需要一个额外的旁路电容器 (Cbyp) 来绕过降压转换器 IC U1 电源电压。肖特基二极管 D3 避免了 U1 在启动期间因 Cbyp 充电电流而承受过大应力的可能性。对于直接参考的信号，或者通过普通降压转换器中接地的电阻器或电容器参考的信号，需要特别小心。例如，对于 U1 的 GND-、FB-、EN-/UVLO-、PG-、RT 和 VCC 引脚，这些信号需要在 neg VOUT 的反相降压/升压转换器中参考。可施加于反相降压/升压转换器的输入电压小于可施加于同一降压转换器的输入电压。这种关系是因为 IC 的 GND 引脚连接到负输出电压 Neg VOUT。因此，转换器 IC U1 两端的输入电压为 VIN + |Neg VOUT|。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

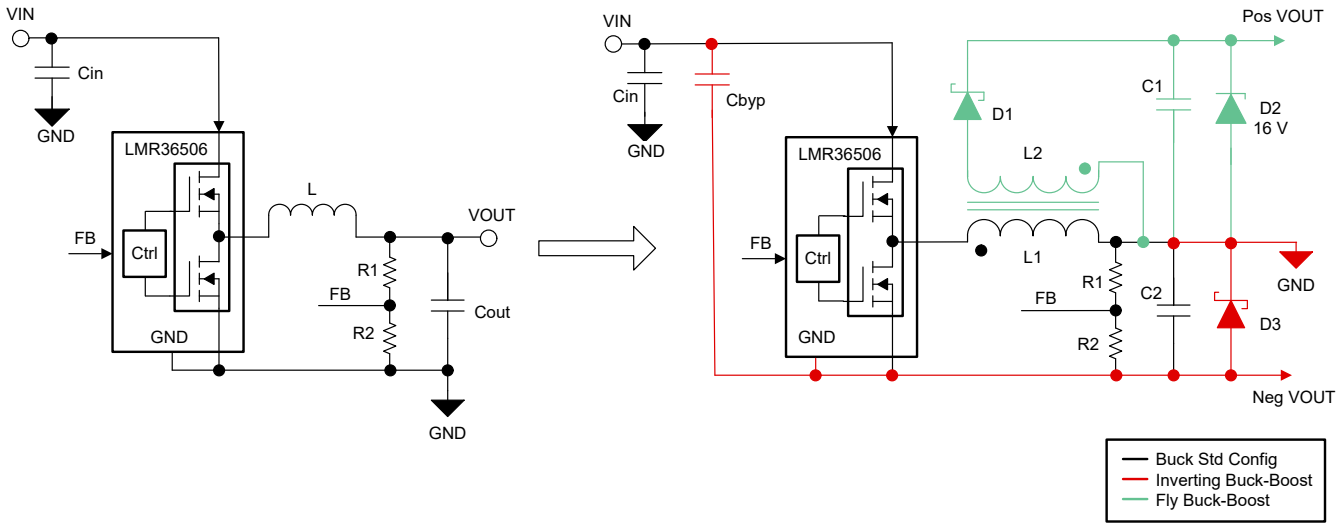

图 1-1. 降压转换器与 Fly-Buck-Boost 转换器

下一步是通过添加绿色所示的元件和连接，将反相降压/升压转换为所需的 Fly-Buck-Boost 拓扑。这些连接是现有电感器 (L1) 上的第二绕组 (L2)、整流肖特基二极管 (D1)、输出电容器 (C1) 和钳位齐纳二极管 (D2)。两个绕组 L1 和 L2 最好具有相同的匝数，从而形成匝数比为 1:1 的耦合电感器。大多数电感器制造商都以现成产品的形式提供此类电感器配置。转换器导通期间 L1 存储的能量会在关断期间由 L1 和 L2 通过 U1 的低侧 FET 和肖特基二极管 D1 释放到输出电容器 C2 和 C1。由于绕组的匝数比为 1:1，L1 和 L2 在关断期间具有相同的电压，从而使非稳压正输出电压 (Pos VOUT) 与稳压良好的负输出电压 (Neg VOUT) 实现良好匹配。Pos VOUT 的其余容差是由于 Pos VOUT 上中等至最大输出电流条件下 D1 的正向压降造成的，其中压降与温度和负载有关。在 Pos VOUT 上的输出电流非常低时，由于不可避免的尖峰导致峰值整流，该电源轨会略有上升。后一种行为由钳位齐纳二极管 D2 处理，其中二极管的齐纳电压略大于预期为 Pos VOUT 的最大标称电压。

2 Fly-Buck-Boost 转换器的具体实现

图 2-1 展示了所实现设计的原理图。这里为 U1 选择了 LMR36506 降压转换器的可调版本，因为该版本具有宽输入电压范围和 2mm×2mm 的小尺寸。建议的 65V 最大输入电压支持 35V 目标电源和 -15V Neg VOUT。U1 产生的电源电压应力为 35V +|-15V|= 50V，如原理图所示。

此实现为 Neg VOUT 增加或 VIN 上的瞬变留出了足够的裕度。这里选择了该器件的强制 PWM 版本 (LMR36506RFRPER) 以实现固定频率运行。之所以选择该版本还因为，不管负载条件如何（即从空载到满载），也不管两个输出具有平衡负载还是完整不对称的负载，都能够实现出色的负载和交叉调节性能。该器件支持在 200kHz 至 2.2MHz 的宽范围内调节开关频率。通过将 U1 的 RT 引脚连接到 VCC 引脚，可以选择 1MHz 频率作为尺寸和效率之间的合理折衷。所选频率支持使用尺寸为 6mm × 6mm 的小型耦合电感器 (L1)。负输出电压 (Neg VOUT) 通过输出分压器 R3、R7（和 R10）调节为 -15V。R10 允许注入小交流信号，使用测试点 A 和 B 进行环路稳定性评估和测量，并可在最终电路中替换为 0Ω 电阻器。C10 是一个可选的前馈电容器（未在评估电路中使用），用于修改环路（传递函数）。

PNP BJT Q1 与 R1、R2、R4 和 R9 一起构成电平转换器，为 U1 生成一个依赖于 VIN 的 EN 信号，该信号完全独立于 Neg VOUT 的值。根据该电平转换器的特定元件值，整个电路在大约 14.4V 的电源电压电平下导通，并在大约 10.7V 时关断。

English Document: SNVAA84
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

2.1 原理图

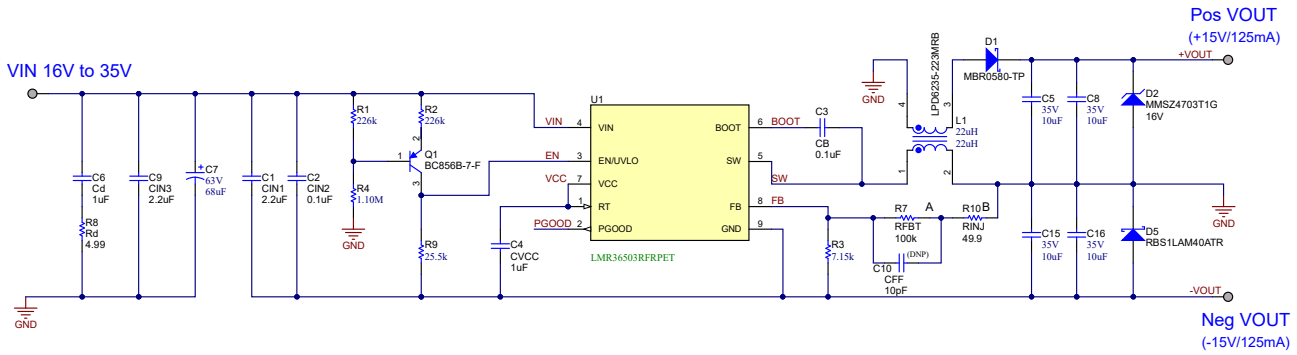

图 2-1. 分离轨 Fly-Buck-Boost 拓扑

2.2 物料清单

表 2-1 突出显示了节 2.1 中用于设计原理图的器件。

表 2-1. 物料清单

项目编号	标识符	数量	器件型号	制造商	说明	封装参考
1	!PCB	1	BSR086	不限	印刷电路板	
2	C1、C9	2	CGA5L3X7S2A225K160AB	TDK	电容，陶瓷，2.2μF，100V，+/-10%，X7S，AEC-Q200 1 级，1206	1206
3	C2	1	GRM188R72A104KA35D	MuRata	电容，陶瓷，0.1uF，100V，+/-10%，X7R，0603	603
4	C3	1	GCM155R71C104KA55D	MuRata	电容，陶瓷，0.1uF，16V，+/-10%，X7R，0402	402
5	C4	1	8.85012E+11	Wuerth Elektronik	电容，陶瓷，1μF，16V，+/-10%，X7R，0603	603
6	C5、C8、C15、C16	4	CGA5L1X7R1V106K160AC	TDK	电容，陶瓷，10uF，35V，+/-10%，X7R，AEC-Q200 1 级，1206_190	1206_190
7	C6	1	C3216X7R2A105K160AA	TDK	电容，陶瓷，1uF，100V，+/-10%，X7R，1206	1206
8	C7	1	UCD1J680MNL1GS	Nichicon	电容，铝制，68μF，63V，+/-20%，SMD	D10xL10mm
9	D1	1	MBR0580-TP	Micro Commercial Components（美微科半导体公司）	二极管，肖特基，80V，0.5A，SOD-123	SOD-123
10	D2	1	MMSZ4703T1G	ON Semiconductor	二极管，齐纳，16V，500mW，SOD-123	SOD-123

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

表 2-1. 物料清单（续）

项目编号	标识符	数量	器件型号	制造商	说明	封装参考
11	D5	1	RBS1LAM40ATR	Rohm	二极管，肖特基，20V，1A，PMDTM	SOD128
12	L1	1	LPD6235-223MRB	Coilcraft	电感器，22uH，1.73A，0.3Ω，SMD	6x6mm
13	LBL1	1	THT-14-423-10	Brady	热转印可打印标签，0.650"（宽）x 0.200"（高）- 10,000/卷	PCB 标签，0.650 x 0.200 英寸
14	Q1	1	BC856B-7-F	Diodes Inc.	晶体管，PNP，65V，0.1A，SOT-23	SOT-23
15	R1	1	CRCW04021M10FKED	Vishay-Dale	电阻，1.10M，1%，0.063W，AEC-Q200 0 级，0402	402
16	R2、R4	2	CRCW0402226KFKED	Vishay-Dale	电阻，226k，1%，0.063W，AEC-Q200 0 级，0402	402
17	R3	1	CRCW04027K15FKED	Vishay-Dale	电阻，7.15k，1%，0.063W，AEC-Q200 0 级，0402	402
18	R7	1	CRCW0402100KFKED	Vishay-Dale	电阻，100k，1%，0.063W，AEC-Q200 0 级，0402	402
19	R8	1	CRCW06034R99FKEA	Vishay-Dale	电阻，4.99，1%，0.1W，AEC-Q200 0 级，0603	603
20	R9	1	CRCW040225K5FKED	Vishay-Dale	电阻，25.5k，1%，0.063W，AEC-Q200 0 级，0402	402
21	R10	1	CRCW040249R9FKED	Vishay-Dale	电阻，49.9，1%，0.063W，AEC-Q200 0 级，0402	402
22	TP1、TP6、TP7	3	1502-2	Keystone	引脚，双转塔，TH	Keystone1502-2
23	U1	1	LMR36506RFRPER	德州仪器 (TI)	LMR36503/06-Q1 宽输入 60V 同步直流/直流降压转换器，RPE0009A (VQFN-9)	RPE0009A
24	C10	0	CGA2B2C0G1H100D050BA	TDK	电容，陶瓷，10pF，50V，+/-5%，C0G/NP0，AEC-Q200 1 级，0402	402
25	FID1、FID2、FID3、FID4、FID5、FID6	0	不适用	不适用	基准标记。没有需要购买或安装的元件。	不适用

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

3 测试结果

3.1 启动行为

图 3-1 展示了 Fly-Buck-Boost 配置的典型启动行为，其中正负电源轨上的信号会在 VIN 供电的情况下对称上升。粉色线表示 16V 的输入电压、深蓝色线和浅蓝色线是对称上升到 ±15V 的正电源轨和负电源轨信号。

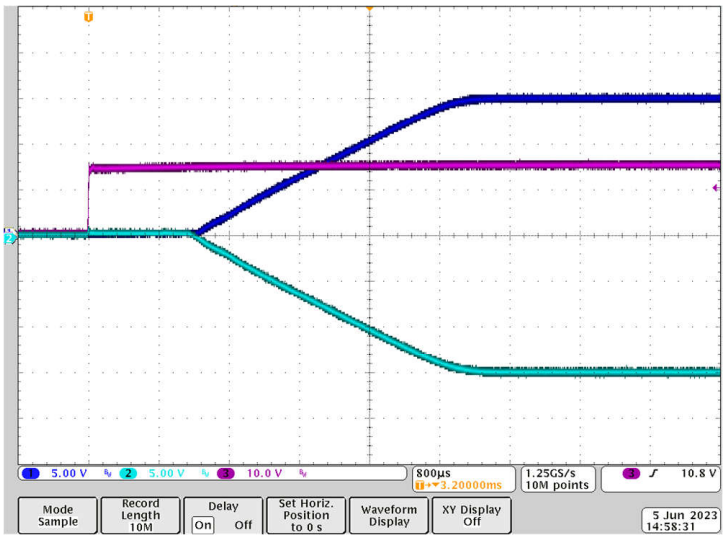

图 3-1. Fly-Buck-Boost 拓扑的启动行为

3.2 系统环路稳定性

环路稳定性是系统中的一个重要因素。稳定设计的指导原则是所需的相位裕度至少为 45°。这里在以下条件下针对所述的 Fly-Buck-Boost 设计测量了环路稳定性：

1. VIN 16V、Pos VOUT 和 Neg VOUT 之间的负载电阻为 240 Ω
2. VIN 24V、Pos VOUT 和 Neg VOUT 之间的负载电阻为 170 Ω
3. VIN 35V，Pos VOUT 和 Neg VOUT 之间的负载电阻为 150 Ω

图 3-2 展示了上述条件下测得的增益和相位裕度图，其中交叉频率约为 20kHz 且相位裕度在 60° 范围内。这些测试点可确保设计稳定。

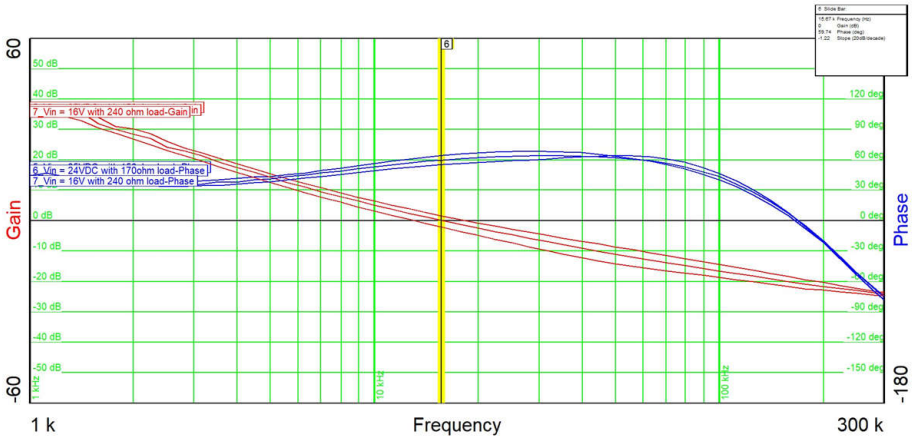

图 3-2. 系统环路稳定性

English Document: SNVAA84
Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

3.3 热行为

热测试是在修改后的 LMR36506RFRPER EVM 板上进行的，以确保元件能够承受工业温度范围。我们观察了电感器、直流/直流转换器和二极管等三个主要元件在最小和最大 VIN 条件下的温度，分别如图 3-3 和图 3-4 所示。

当 VIN 为 16V 且两个输出通道上的负载都为 175mA 时，电感器和直流/直流转换器的温度处于 48°C 的范围内，而二极管保持在 32.6°C。当 VIN 为 35V 且两个输出通道上的负载都为 250mA 时，电感器和直流/直流转换器的温度处于 50°C 的范围内，而二极管的温度保持在 33.4°C。该热输出展示了电路板的热指标，这些指标完全处于工业温度范围内。

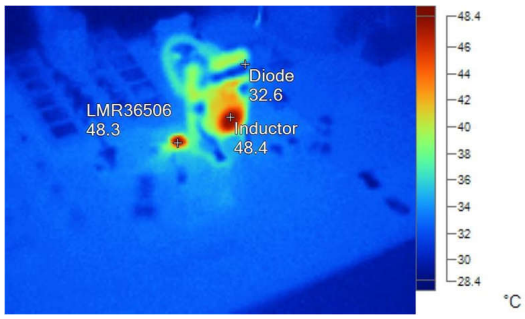

图 3-3. Vin 为 16V 且两个电源轨上的负载为 175mA 时的热行为

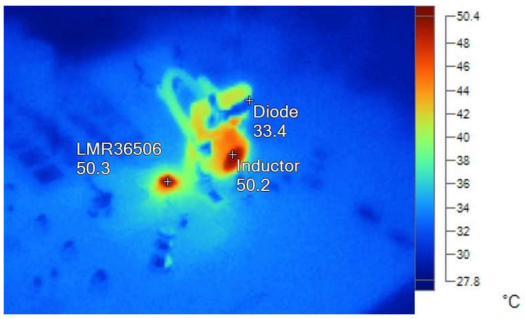

图 3-4. Vin 为 35V 且两个电源轨上的负载为 250mA 时的热行为

3.4 VOUT 纹波和 SW 节点波形

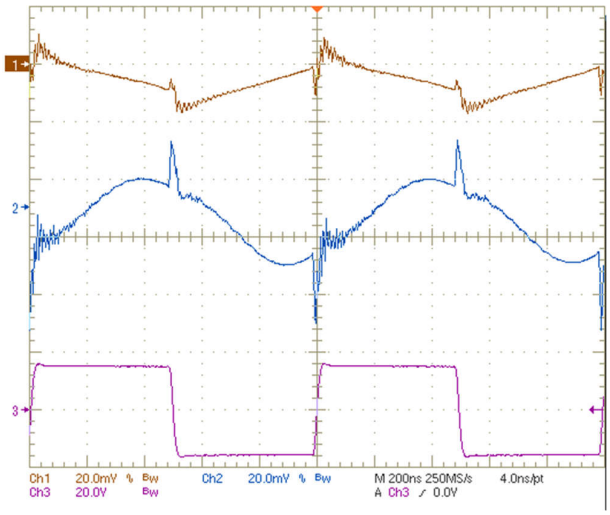

图 3-5. Vin 为 16V 且两个电源轨的负载为 125mA 时的 VOUT 纹波和 SW 节点波形

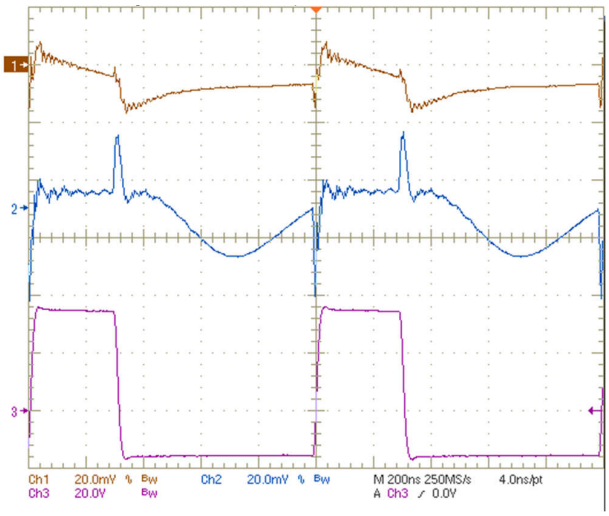

图 3-6. Vin 为 35V 且两个电源轨的负载为 125mA 时的 VOUT 纹波和 SW 节点波形

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

3.5 效率数据

3.5.1 平衡负载的效率数据

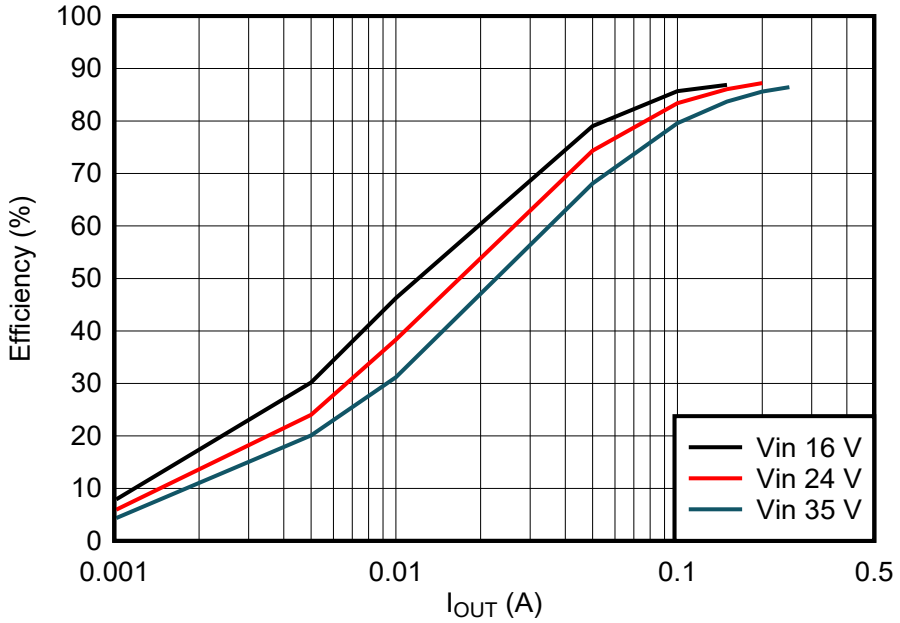

图 3-7. 平衡负载条件下效率与输出电流间的关系

3.5.2 不平衡负载的效率数据

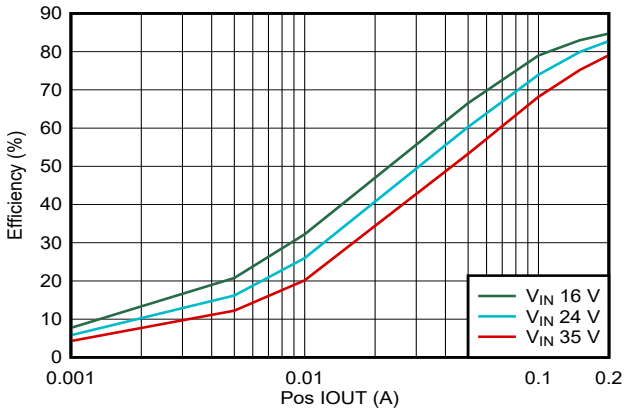

图 3-8. Neg IOUT 设置为 1mA 且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率

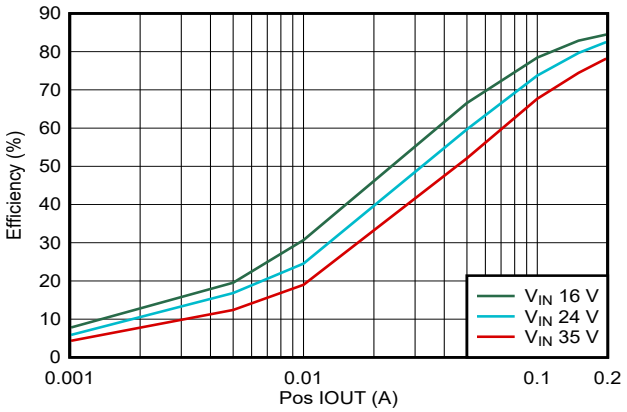

图 3-9. Pos IOUT 设置为 1mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

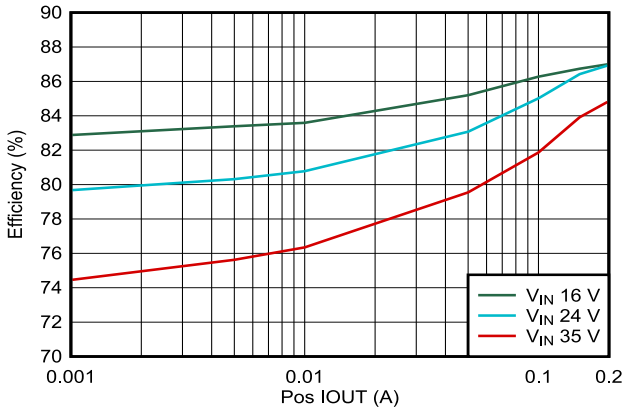

图 3-10. Neg IOUT 设置为 150mA 且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率

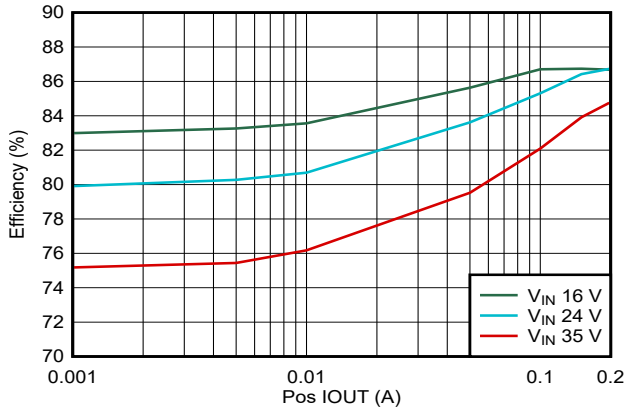

图 3-11. Pos IOUT 设置为 150mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的效率

3.6 负载调整率

3.6.1 平衡负载的负载调节

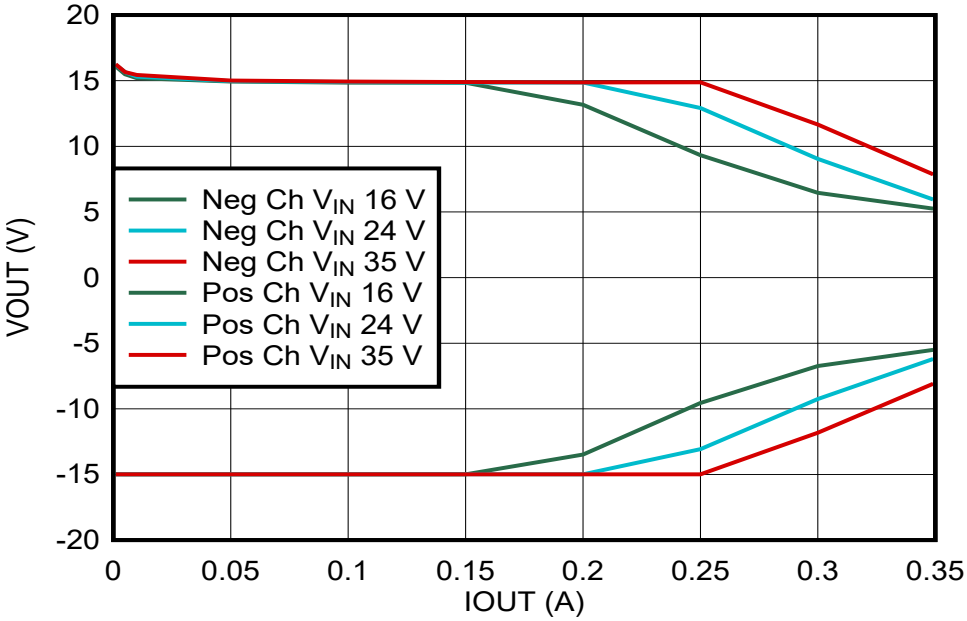

图 3-12. 平衡负载条件下输出电压与输出电流间的关系

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

3.6.2 不平衡负载的负载调整率

备注

在下图中，虚线表示 Pos VOUT (V)，实线表示 Neg VOUT (V)。

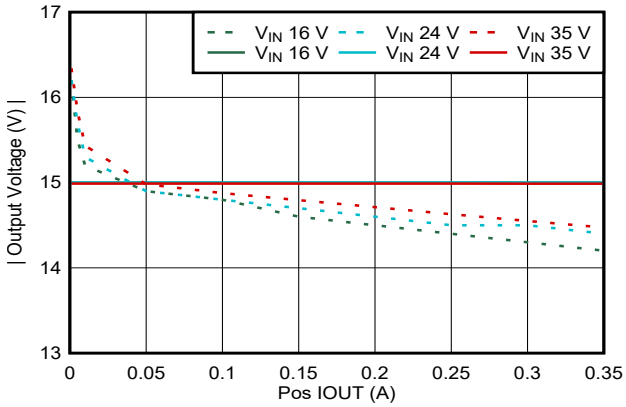

图 3-13. Neg IOUT 设置为 1mA 且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率

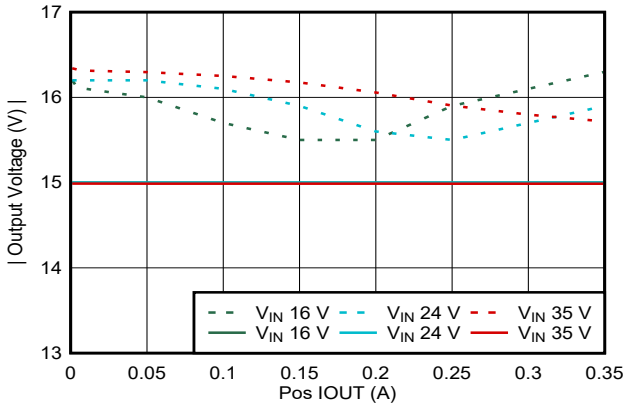

图 3-14. Pos IOUT 设置为 1mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率

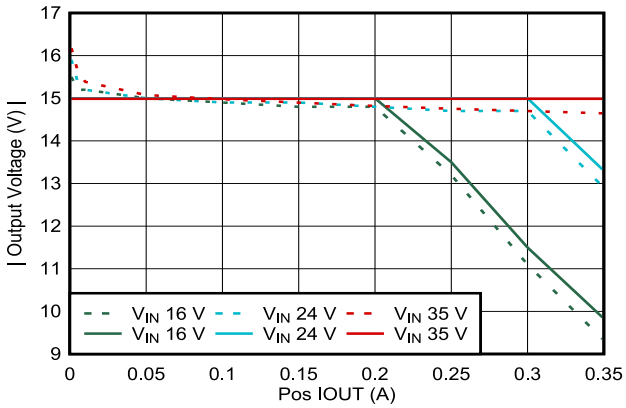

图 3-15. Neg IOUT 设置为 150mA 并且 Pos IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率

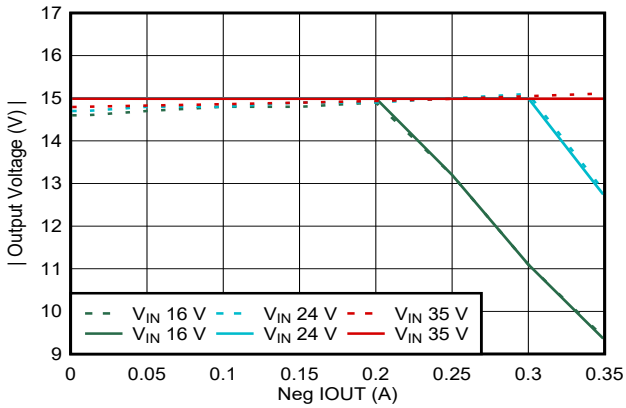

图 3-16. Pos IOUT 设置为 150mA 且 Neg IOUT 从 1mA 增加到 150mA 时的负载调整率

4 总结

LMR36506RFRPER 可配置为分离轨输出 Fly Buck Boost，从而针对平衡负载和非对称负载生成正负输出电源轨。Fly Buck Boost 拓扑改变了一些系统特性和限制，例如输入电压范围和最大输出电流。该拓扑具有 16V 至 35V 的输入电压范围，可支持所需的 125mA 负载电流。在该设计中，输出在负通道上进行调节。本应用手册介绍了分离轨 Fly-Buck-Boost 拓扑及其设计注意事项。本应用手册提供了基于修改后 EVM 设计的测量数据。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*适用于 PLC I/O 模块和其他低功耗应用的隔离式电源拓扑* 应用手册。
2. 德州仪器 (TI)，*适用于 PLC 应用中信号链的 LM5181 双极性 ±18V 输出设计* 应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，*在分离轨拓扑中使用 S62150* 应用手册。
4. 德州仪器 (TI)，*使用 TPS54335A 创建反向电源* 应用手册。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

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出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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司