



Aurora Tie, Hongjia Wu, Daniel Li

摘要

降压转换器通常作为恒压 (CV) 稳压器来实现。当输入电压和负载电流发生变化时，控制环路会调节占空比，从而保持输出电压恒定。

不过，最近许多应用都需要同时调节输出电流和输出电压。这通常称为恒流恒压 (CC/CV) 调节。通常，为实现 CC/CV 调节，设计人员需要修改向反馈环路添加电路的 CV 调节方案。本应用手册介绍了如何将配置为 CV 稳压器的峰值电流模式 (PCM) 控制方案转换为 CC/CV 稳压器。本文所建议的方法可应用于控制器、转换器或模块。此外，本文还提供了测试结果来证明可行性。

内容

1 简介.....	2
2 简单的通用 CC/CV 配置电路.....	2
2.1 CC 电路设计.....	2
2.2 CV 电路设计.....	3
3 示例原理图.....	4
4 测试结果和性能曲线.....	4
4.1 测试方法.....	4
4.2 电源模块 (TPSM63610).....	5
4.3 转换器 (LM61495).....	6
4.4 控制器 (LM5149).....	7
5 总结.....	8
6 参考文献.....	8

插图清单

图 2-1. CC/CV 配置电路.....	2
图 2-2. 外部 CC 电路.....	3
图 2-3. 外部 CV 电路.....	4
图 3-1. 使用 TPSM63610EVM 或 LM61495EVM 时的 5V、8A 输出 CC/CV 原理图.....	4
图 4-1. CC/CV 电路板和 TPSM63610EVM 的物理连接图.....	5
图 4-2. TPSM63610 在不同输入电压下的负载调整率 (降低 $R_{load} (V_{out} / I_{out})$)	5
图 4-3. TPSM63610 负载和线性调整率.....	5
图 4-4. TPSM63610 的稳态波形.....	5
图 4-5. TPSM63610 的负载瞬态性能 (CV 至 CC)	6
图 4-6. TPSM63610 的负载瞬态性能 (CC 至 CV)	6
图 4-7. LM61495 在不同输入电压下的负载调整率 (降低 $R_{load} (V_{out} / I_{out})$)	6
图 4-8. LM61495 负载和线性调整率.....	6
图 4-9. LM61495 的稳态波形.....	6
图 4-10. LM61495 的负载瞬态性能 (CV 至 CC)	7
图 4-11. LM61495 的负载瞬态性能 (CC 至 CV)	7
图 4-12. LM5149 在不同输入电压下的负载调整率 (降低 $R_{load} (V_{out} / I_{out})$)	7
图 4-13. LM5149 负载和线性调整率.....	7
图 4-14. LM5149 的稳态波形.....	7
图 4-15. LM5149 的负载瞬态性能 (CV 至 CC)	8
图 4-16. LM5149 的负载瞬态性能 (CC 至 CV)	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

目前，许多应用对 CC/CV 稳压器的需求不断增长，例如超级电容器能量备份、电动自行车 GSM 模块和多节电池组、USB 电力传输、用于 48V 总线架构的服务器 BBU 等。然而，降压稳压器通常通过 CV 调节来实现，因此需要使用外部电路来实现 CC/CV 调节。

本应用手册提供了一种简单的 CC/CV 配置，该配置可添加到大多数具有 PCM 控制的降压稳压器产品中，包括控制器、转换器和模块。本文讨论了设计原理和设计注意事项，并提供了测试结果来表明设计实现的可行性。

2 简单的通用 CC/CV 配置电路

通常，可以使用从输出到相关 FB 引脚的外部电阻分压器来设置降压稳压器的输出电压，从而实现 CV 调节。为了实现 CC 调节，需要在反馈环路中添加电流检测电路。该电路向 FB 引脚提供与输出电流成比例的电压信号。但是，为防止 CC/CV 调节方案同时工作，需要在电压反馈环路中添加一个额外的跟随器电路。将跟随器电路添加到 CV 反馈环路可确保在任何给定时间仅 CC 或 CV 调节受控。FB 引脚上具有较高电压的反馈环路决定了两个调节方案中的哪一个处于受控状态。图 2-1 展示了常见的 CC/CV 方案。

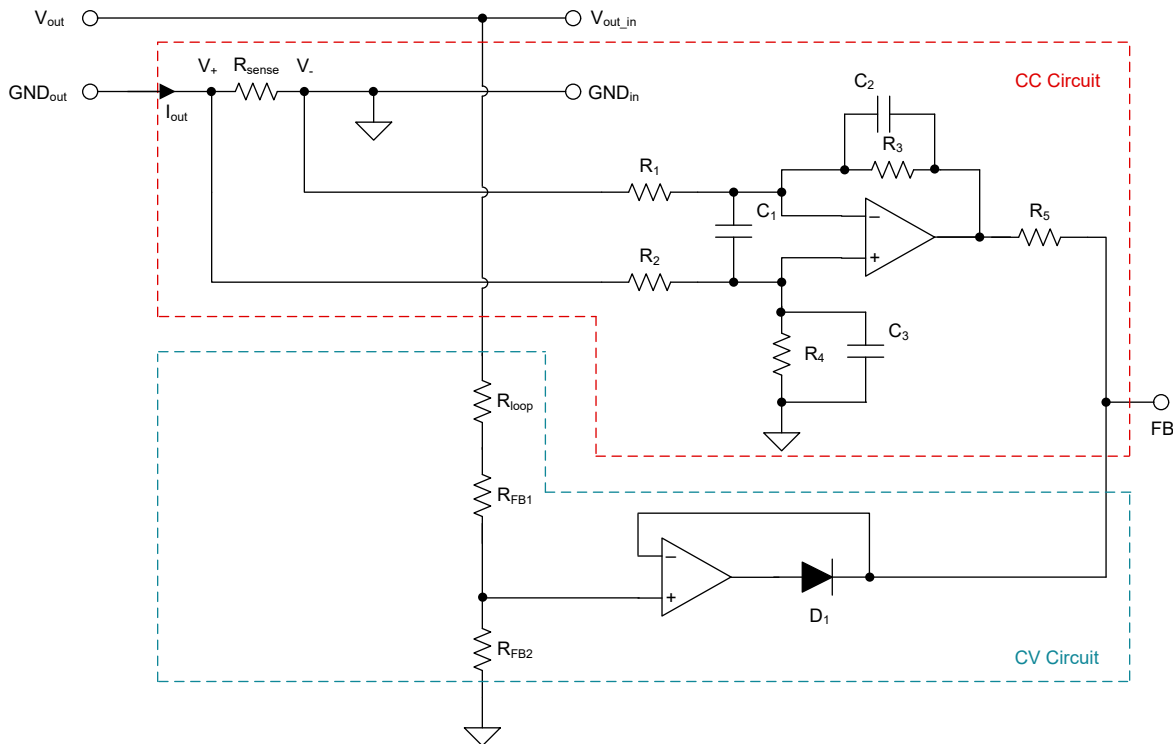


图 2-1. CC/CV 配置电路

2.1 CC 电路设计

如图 2-2 所示，CC 调节方案由一个电流检测电阻和一个差分放大器组成。输出电流流经电流检测电阻时，会产生差分电压。该电压会被放大并经电平转换为以地为基准的电压。该以地为基准的电压与流经电流检测电阻的输出电流成正比。当环路处于调节状态时，FB 引脚电压等于稳压器的内部基准电压。

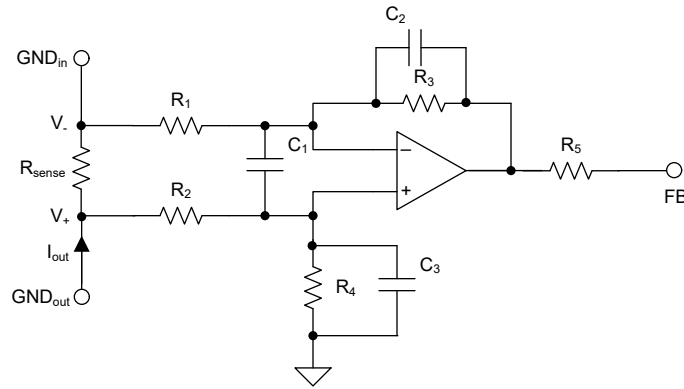


图 2-2. 外部 CC 电路

方程式 1 展示了在电流检测电阻上检测到的电压、输出电流和差分放大器增益之间的关系。

$$V_{FB} = K \times I_{out} \times R_{sense} \quad (1)$$

I_{out} 为输出电流， R_{sense} 为电流检测电阻， K 为差分放大器的增益。方程式 2 在 $R_1 = R_2$ 、 $R_3 = R_4$ 时同样适用。

$$K = \frac{R_3}{R_1} \quad (2)$$

对于大多数具有 PCM 控制的转换器，在调节时，FB 引脚电压等于误差放大器的内部基准电压 (V_{ref})。请注意，基准电压可能因产品而异。例如，TPSM63610 和 LM5149 的 V_{ref} 分别为 1V 和 0.8V。

$$V_{FB} = V_{ref} \quad (3)$$

结合方程式 1、方程式 2 和方程式 3，其中包括差分放大器的增益、电流检测电阻值以及所使用的稳压器基准电压，可将输出电流设置为所需的电平。方程式 4 用于计算所选电流检测电阻中的功率损耗。

$$P_{sense} = I_{out}^2 \times R_{sense} \quad (4)$$

较高的损耗不仅会增加工作温度，还会降低系统效率，因为所有输出电流都将流经 R_{sense} 。一般而言，考虑到电流检测电阻封装尺寸和功率损耗，电阻不能过高。本应用手册选择了 $10\text{m}\Omega$ 的电流检测电阻并发布了实验结果。差分放大器电路中的电容器 C_2 和 C_3 的值与 CC 电路环路相关。由于 CC 和 CV 电路均添加至 FB 引脚，为了稳定环路，需要尽可能减慢 CC 环路。我们建议 C_2 和 C_3 的值介于 1nF 和 10nF 之间。

例如，假设 $I_{out} = 8\text{A}$ 且 $R_{sense} = 10\text{m}\Omega$ 。在 TPSM63610EVM 或 LM61495EVM 上使用此电路时，鉴于 $V_{ref} = 1\text{V}$ ，使用方程式 1 至方程式 3，可以得出 $R_1 = R_2 = 1\text{k}\Omega$ ， $R_3 = R_4 = 12.5\text{k}\Omega$ 。

CC 和 CV 电路中的运算放大器可由外部 LDO 供电，电源电压为 5V。但在实际应用中，如果芯片 VCC 引脚的输出电压也是 5V，就可以直接使用 VCC 引脚为运算放大器供电。请注意 VCC 引脚具有电流限制，因此需要在 CC 电路的输出端添加一个 $1\text{k}\Omega$ 的电阻器（图 2-2 中的 R_5 ），以便限制电流。

此外，以上电路使用低侧电流检测，且 R_{sense} 的两端为 GND_{in} 和 GND_{out} 。该电路也可以采用高侧电流检测， R_{sense} 的两端为 V_{out_in} 和 V_{out} 。因此，需要根据输出电压选择合适的运算放大器，主要考虑运算放大器的电源电压范围和共模 (CM) 电压范围。

2.2 CV 电路设计

图 2-3 中所示的 CV 电路主要由上反馈电阻和下反馈电阻（分别用 R_{FB1} 和 R_{FB2} 表示）、一个跟随器和一个二极管组成。通过使用方程式 5 调整 R_{FB1} 和 R_{FB2} 的电阻值，可调整该电路的输出电压。

$$R_{FB1} = \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right) \times R_{FB2} \quad (5)$$

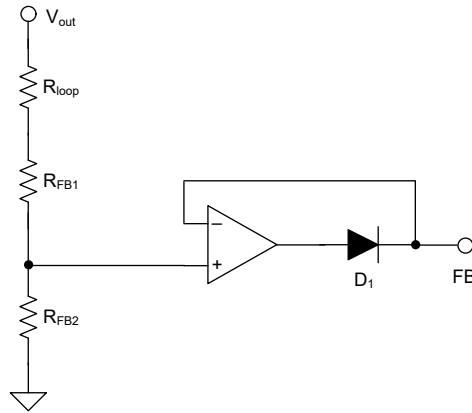


图 2-3. 外部 CV 电路

例如，假设 $V_{out} = 5V$ 。在 TP5M63610EVM 或 LM61495EVM 上使用该电路时，根据方程式 5，可以得出 $R_{FB1} = 100k\Omega$ ， $R_{FB2} = 24.9k\Omega$ 。

有关如何选择 R_{FB1} 和 R_{FB2} 的电阻值，请参阅相关降压产品的数据表。此外，图 2-3 中的电阻器 R_{loop} 用于测量频率响应，使用典型值 49.9Ω 。二极管 D_1 主要用于确保一次只有一个环路（电流环路或电压环路）工作。在本应用手册中，电压环路是主环路，电流环路是次级环路。一般而言，可尽可能地降低电流环路的速度，从而避免干扰电压环路。最后，缓冲器的负反馈绕在二极管 D_1 上，用于确保消除二极管压降和温度变化的影响，并且不会影响电压设定精度。

3 示例原理图

图 3-1 展示了外部 CC/CV 电路板的原理图。这些参数专为 TP5M63610EVM 和 LM61495EVM 设计，用于实现 CC/CV 功能。恒定电流为 8A 且恒定电压为 5V。我们选择使用 EVM 板上的 VCC 作为 5V 电源，而不使用 LDO。

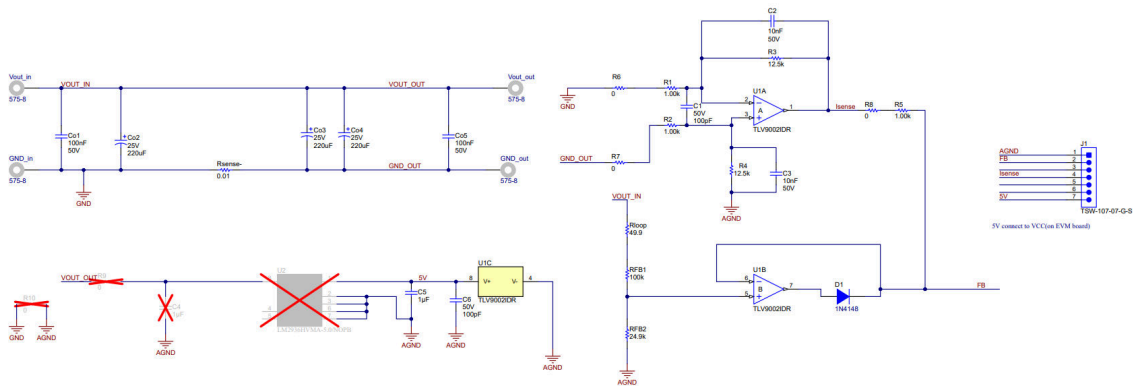


图 3-1. 使用 TP5M63610EVM 或 LM61495EVM 时的 5V、8A 输出 CC/CV 原理图

4 测试结果和性能曲线

4.1 测试方法

图 4-1 展示了 CC/CV 电路板和 TP5M63610EVM 的物理连接图。

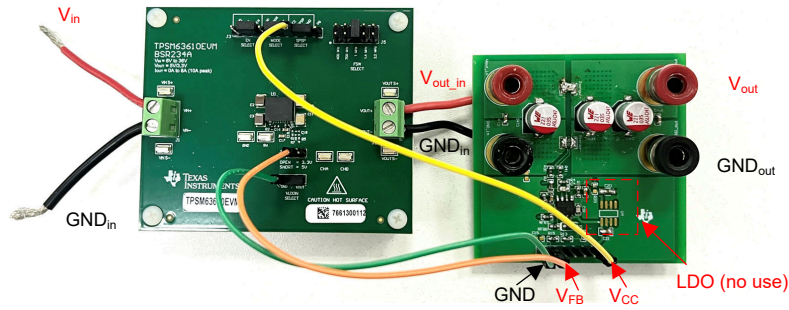


图 4-1. CC/CV 电路板和 TPSM63610EVM 的物理连接图

4.2 电源模块 (TPSM63610)

图 4-2 展示了 TPSM63610 在输出电阻降低时的负载调整率和电压设定值。图 4-3 展示了 TPSM63610 的负载和线性调整率。

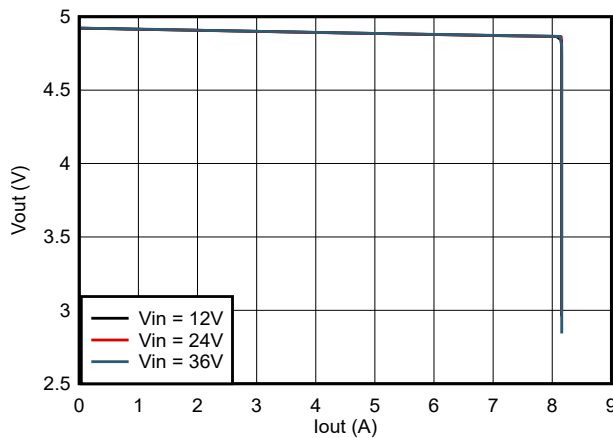


图 4-2. TPSM63610 在不同输入电压下的负载调整率 (降低 R_{load} (V_{out} / I_{out}))

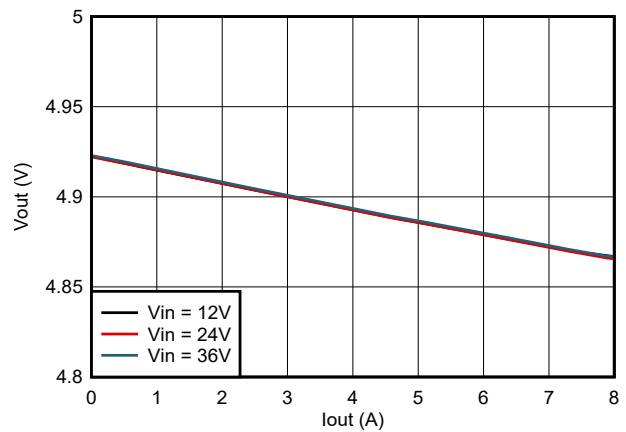


图 4-3. TPSM63610 负载和线性调整率

图 4-4 展示了以下波形：SW (CH1)、36V (V_{in}) 时的 V_{out_ripple} (CH2) 和 I_{out} (CH3) 以及 8A (CC 模式) 时的 4V (V_{out})。

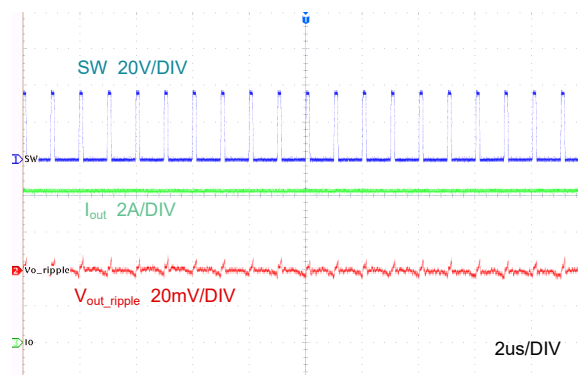


图 4-4. TPSM63610 的稳态波形

图 4-5 和图 4-6 展示了将恒定电阻负载从 10Ω 降至 0.5Ω (CV 至 CC) 以及从 0.5Ω 升至 10Ω (CC 至 CV) 时的负载瞬态性能 V_{out} (CH4) 和 I_{out} (CH3)。

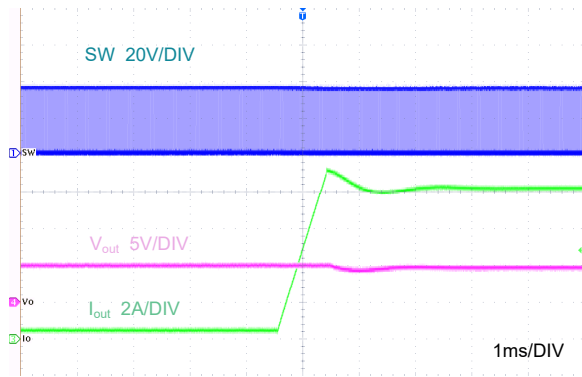


图 4-5. TPSM63610 的负载瞬态性能 (CV 至 CC)

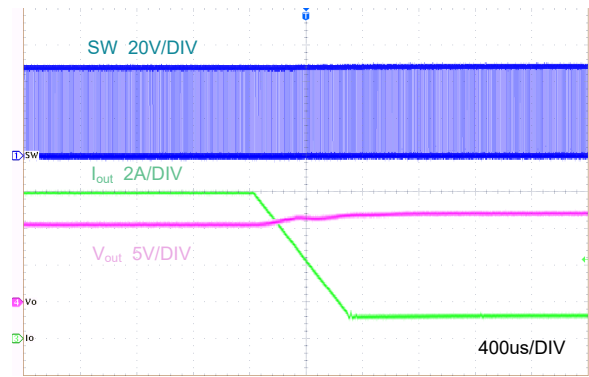


图 4-6. TPSM63610 的负载瞬态性能 (CC 至 CV)

4.3 转换器 (LM61495)

图 4-7 展示了 LM61495 在输出电阻降低时的负载调整率和电压设定。图 4-8 展示了 LM61495 的负载和线性调整率。

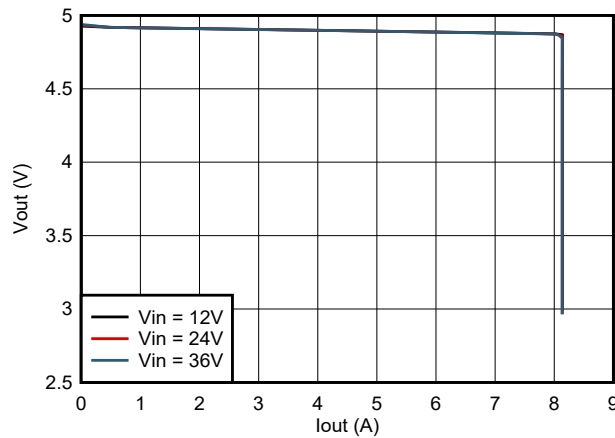


图 4-7. LM61495 在不同输入电压下的负载调整率 (降低 R_{load} (V_{out} / I_{out}))

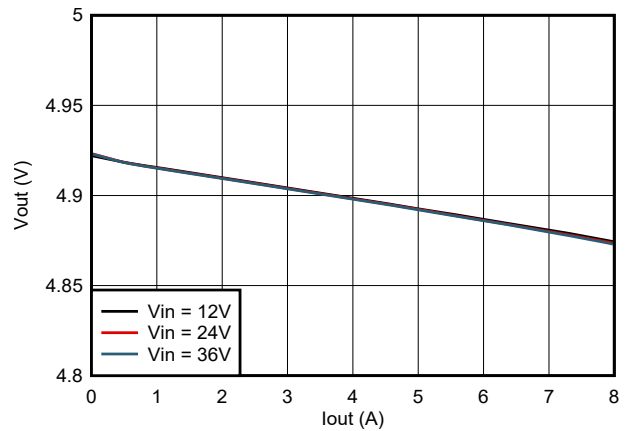


图 4-8. LM61495 负载和线性调整率

图 4-9 展示了以下波形：SW (CH1)、36V (V_{in}) 时的 V_{out_ripple} (CH2) 和 I_{out} (CH3) 以及 8A (CC 模式) 时的 4V (V_{out})。

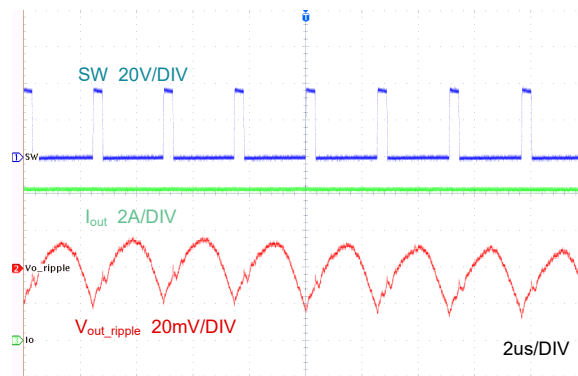


图 4-9. LM61495 的稳态波形

图 4-10 和图 4-11 展示了将恒定电阻负载从 10Ω 降至 0.5Ω (CV 至 CC) 以及从 0.5Ω 升至 10Ω (CC 至 CV) 时的负载瞬态性能 V_{out} (CH4) 和 I_{out} (CH3)。

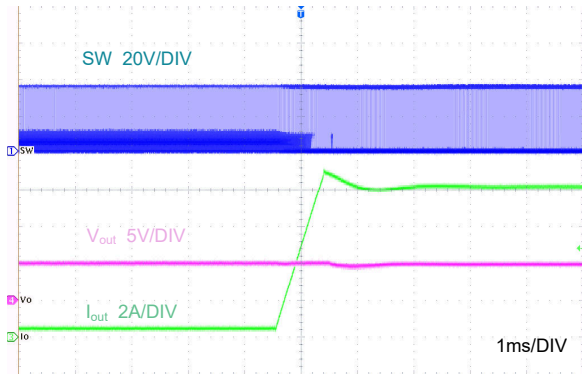


图 4-10. LM61495 的负载瞬态性能 (CV 至 CC)

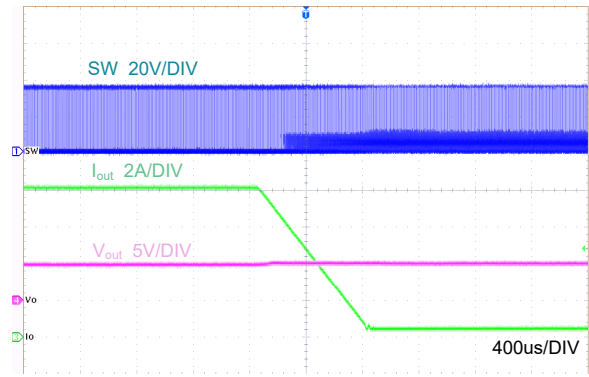


图 4-11. LM61495 的负载瞬态性能 (CC 至 CV)

4.4 控制器 (LM5149)

图 4-12 展示了 LM5149 在输出电阻降低时的负载调整率和电压设定值。图 4-13 展示了 LM5149 的负载和线性调整率。

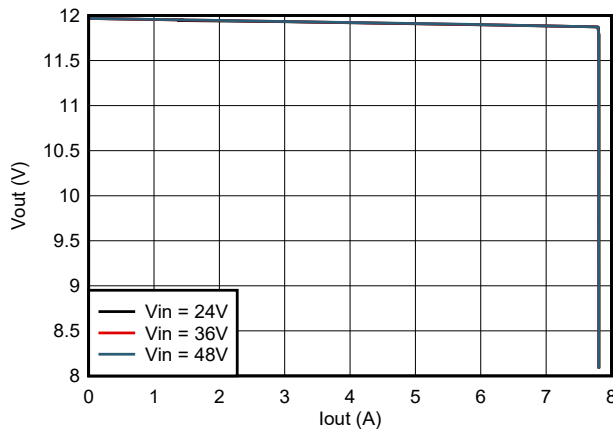


图 4-12. LM5149 在不同输入电压下的负载调整率 (降低 R_{load} (V_{out} / I_{out}))

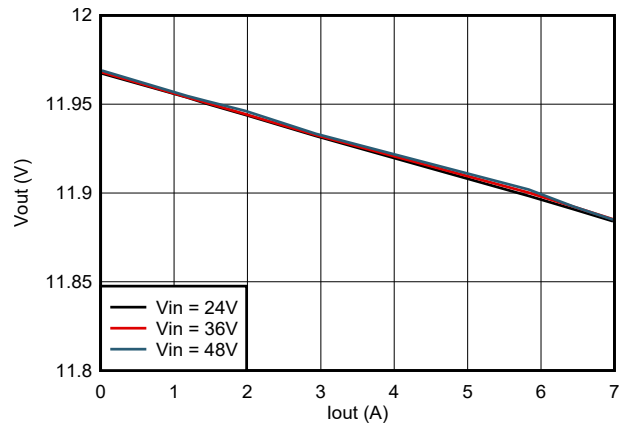


图 4-13. LM5149 负载和线性调整率

图 4-14 展示了以下波形：SW (CH1)、48V (V_{in}) 时的 V_{out_ripple} (CH2) 和 I_{out} (CH3) 以及 8A (CC 模式) 时的 10.4V (V_{out})。

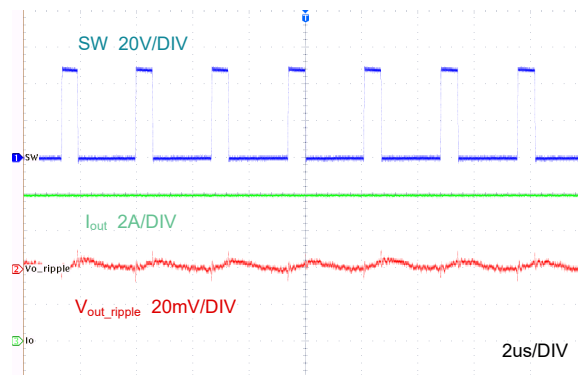


图 4-14. LM5149 的稳态波形

图 4-15 和图 4-16 展示了将恒定电阻负载从 10Ω 降至 1.3Ω (CV 至 CC) 以及从 1.3Ω 升至 10Ω (CC 至 CV) 时的负载瞬态性能 V_{out} (CH4) 和 I_{out} (CH3)。

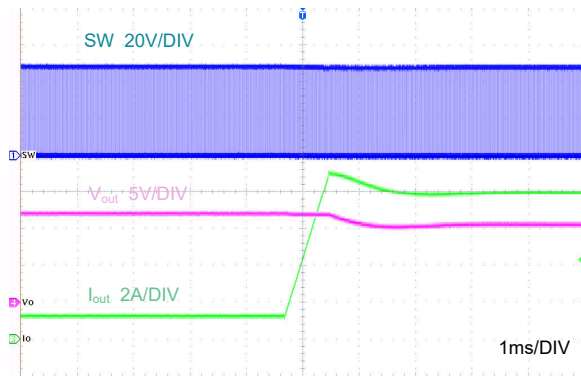


图 4-15. LM5149 的负载瞬态性能 (CV 至 CC)

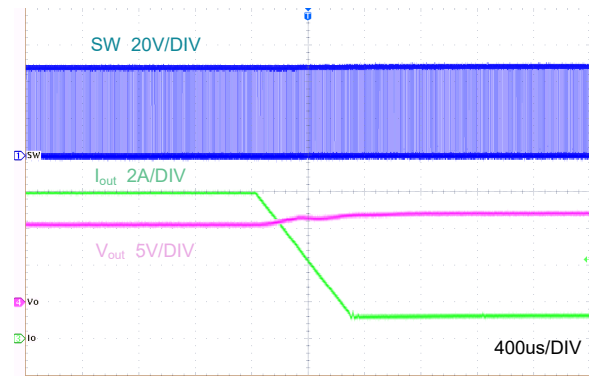


图 4-16. LM5149 的负载瞬态性能 (CC 至 CV)

5 总结

本文中提供的 CC/CV 配置电路基本上适用于所有 PCM 控制的稳压器。整个电路相对简单并具有高通用性，有助于实现具有成本效益的解决方案。

6 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [如何设计简单的恒流/恒压降压转换器](#), 应用手册。
2. 德州仪器 (TI), [TPSM63610EVM 降压稳压器评估模块用户指南](#)。
3. 德州仪器 (TI), [LM61495-Q1EVM EVM 用户指南](#)。
4. 德州仪器 (TI), [LM5149-Q1 降压控制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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司