

# 测量 D-CAP™、D-CAP2™ 和 D-CAP3™ 直流/直流转换器的波特图



Richard Nowakowski

Buck Switch Regulators

## 摘要

稳定性测试是直流/直流转换器评估的重要组成部分。如果运用得当，波特图结果可以是一种非常快速且有用的方法，可帮助衡量转换器的稳定性。在缺乏理论分析的情况下，可以使用网络分析器测量波特图并确认设计的稳定性。可以在波特图中绘制的控制环路增益是直流/直流转换器稳定性的一项出色指标。

## 内容

1 D-CAP 反馈环路.....	1
2 D-CAP 波特图测量设置.....	3
3 波特图测量.....	4
4 瞬态响应波形.....	5
5 D-CAP2 和 D-CAP3 波特图测量设置.....	6
6 测量技巧.....	6
7 总结.....	6
8 参考文献.....	6
9 修订历史记录.....	7

## 插图清单

图 1-1. 电压模式或电流模式控制环路增益设置.....	2
图 1-2. 具有外部 DCR 注入电路的 D-CAP 稳压器方框图.....	2
图 1-3. 正确的 D-CAP 稳压器控制环路波特图测量设置.....	3
图 3-1. 使用建议的测试设置测量的波特图.....	4
图 4-1. 升压负载瞬态响应.....	5
图 4-2. 降压负载瞬态响应.....	5
图 5-1. 正确的 D-CAP2 和 D-CAP3 控制环路波特图测量设置.....	6

## 商标

D-CAP™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 D-CAP 反馈环路

使用 D-CAP、D-CAP2 和 D-CAP3 控制架构的直流/直流转换器（在本报告中称为 D-CAPx），因其快速的瞬态响应和极小的输出电容，以及通过减少外部补偿元件的使用而得以精简的设计变得广受欢迎。D-CAPx 控制架构是非线性恒定导通时间控制架构的衍生品，在测量控制环路增益方面对设计人员提出了挑战。如图 1-1 所示，断开控制环路是传统线性控制架构采用的应对之策，例如电压模式控制和电流模式控制，都只有一个输出反馈路径。但在测量 D-CAPx 架构的控制环路增益时，需要采用不同的方法。如图 1-2 所示，D-CAPx 控制架构有两条直接输出反馈路径：一条通过反馈电阻分压器网络  $R_{up}$  和  $R_{low}$ ，另一条通过直流电阻 (DCR) 注入电路  $R_p$ 、 $C_p$  和  $C_{ff}$ 。D-CAPx 控制系统没有高直流增益误差放大器，而采用电流模式或电压模式控制架构的传统 II 型或 III 型补偿器有，其 FB 引脚通常是误差放大器的负输入。对于 D-CAPx 转换器，FB 引脚只是 PWM 比较器的输入之一。图 1-1 中的设置省略了测量架构的一个反馈路径输出，因此采用这种设置测量的波特图与瞬态响应波形并不直接相关。如图 1-3 所示，要正确测量环路增益波特图，环路断点必须包含两条反馈路径。

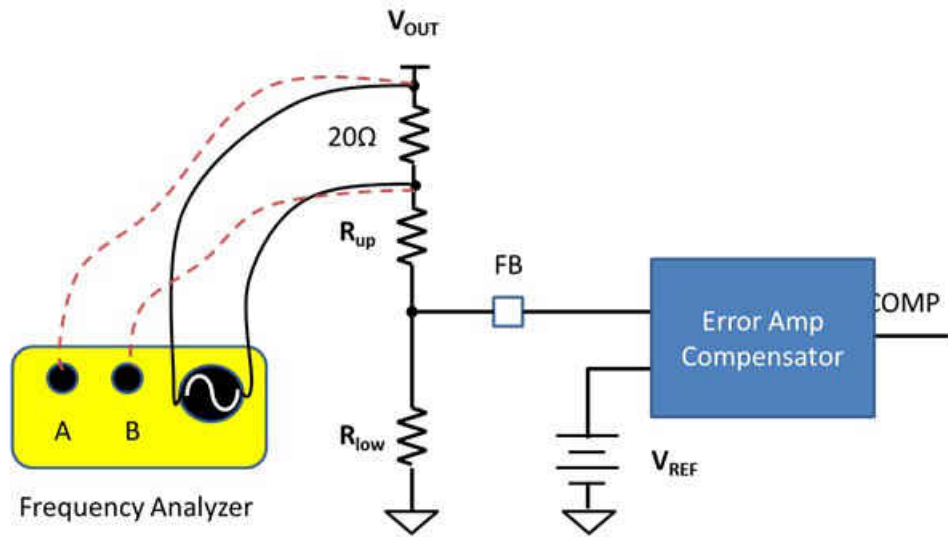


图 1-1. 电压模式或电流模式控制环路增益设置

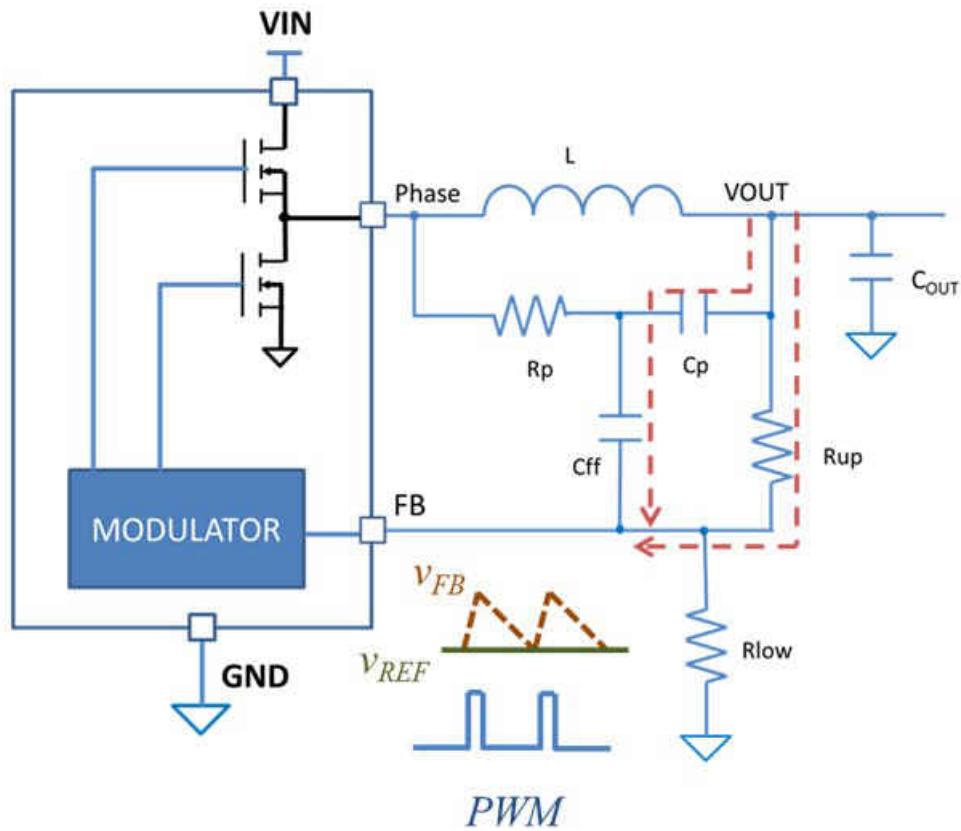


图 1-2. 具有外部 DCR 注入电路的 D-CAP 稳压器方框图

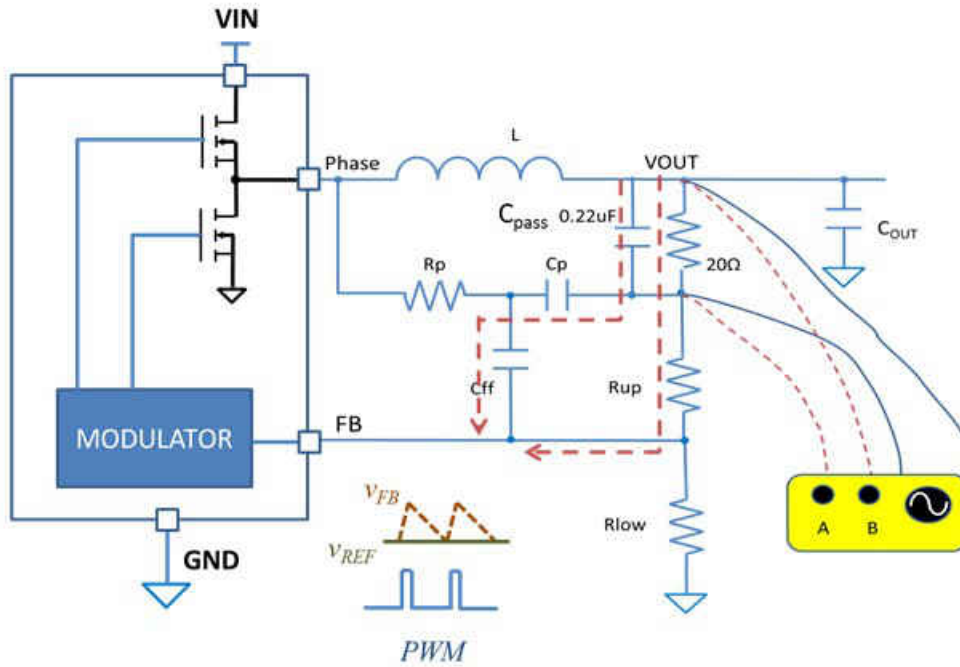


图 1-3. 正确的 D-CAP 稳压器控制环路波特图测量设置

## 2 D-CAP 波特图测量设置

对于 D-CAPx 稳压器，PWM 调制增益由 DCR 注入网络和输出电容器等效串联电阻 (ESR) 在 FB 引脚处形成的三角波形的下降斜率决定。注入电缆上的寄生电感和电阻以及耦合到导线中的噪声会扭曲 FB 引脚处的三角波形，从而导致与具有不正确测试设置的稳压器不同的 PWM 调制增益。要保持精度，可添加一个与 20Ω 电阻并联的旁路电容  $C_{pass}$ ，形成一个高通滤波器。将转角频率设置为低于转换器开关频率的二分之一，以便让 FB 引脚处的三角波形在测试期间与正常工作期间保持相似。在本例中，针对开关频率为 500Hz 的转换器，使用了一个 0.22μF 的电容器。对大多数应用来说，正确的  $C_{pass}$  值应介于 0.1μF 至 0.47μF 之间。为尽量减少对系统的影响，DCR 注入电容  $C_p$  应小于  $C_{pass}$  的十分之一，如图 1-3 所示。

### 3 波特图测量

图 3-1 显示了波特图测量结果，采用的是图 1-3 中显示的测试设置，使用了带有外部 DCR 注入电路且编程为 1.2V 输出的 TPS53319。为  $C_{pass}$  选择了  $0.22\mu\text{F}$  的电容量，为  $C_p$  选择了  $22\text{nF}$  的电容量。通过调整  $R_p$  和  $C_{ff}$ ，将交叉频率设置为开关频率的六分之一，相位裕度为 66 度。

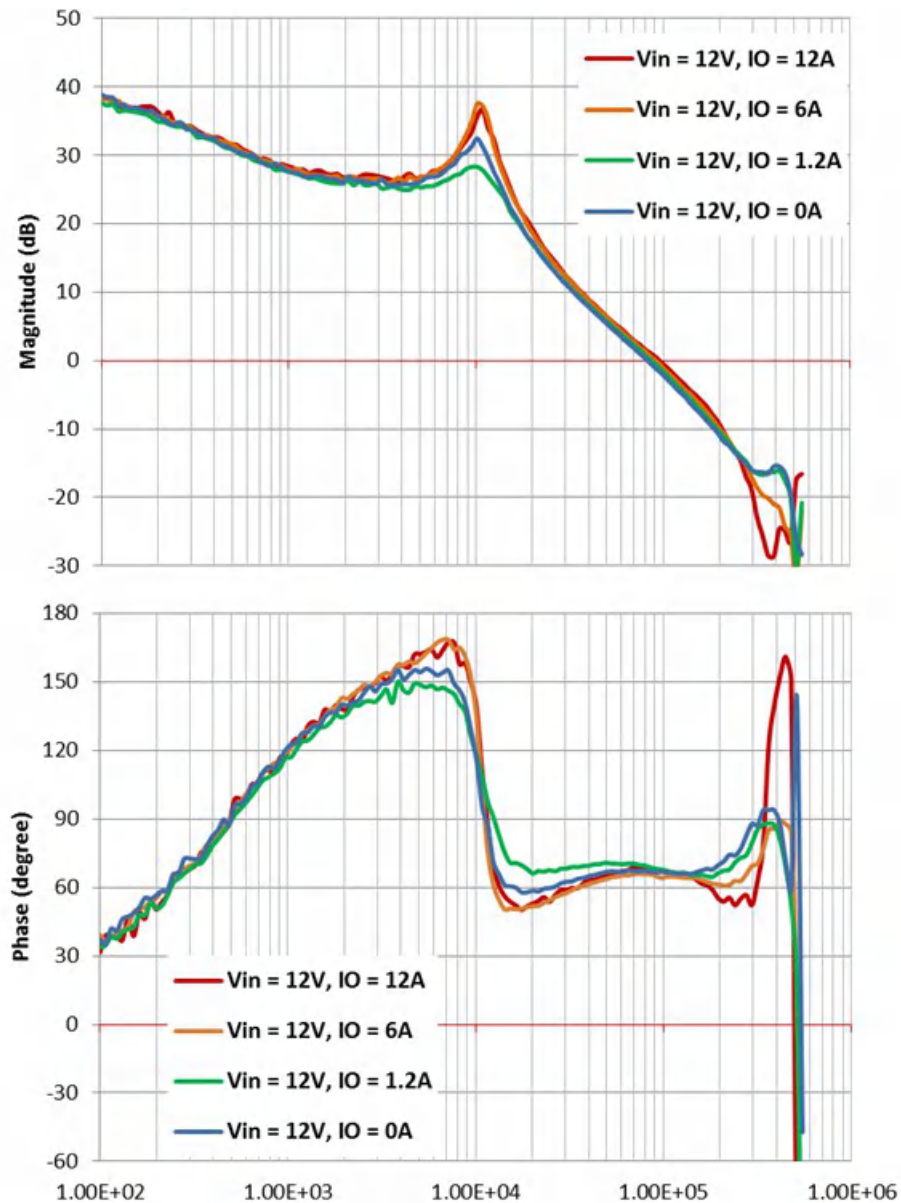


图 3-1. 使用建议的测试设置测量的波特图

## 4 瞬态响应波形

图 4-1 和图 4-2 显示了使用配置了 1.2V 输出的 TPS53319 在升压和降压负载瞬态期间的相应瞬态响应波形。瞬态波形行为与图 3-1 中的波特图相关。

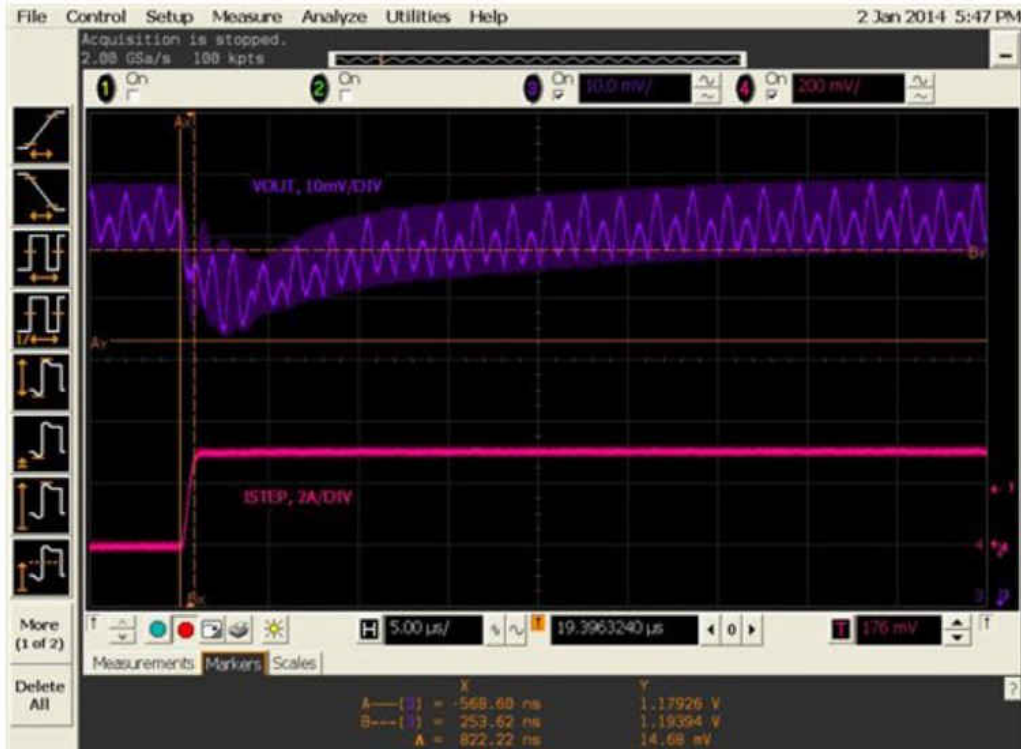


图 4-1. 升压负载瞬态响应



图 4-2. 降压负载瞬态响应

## 5 D-CAP2 和 D-CAP3 波特图测量设置

对于 D-CAP2 和 D-CAP3 控制系统，DCR 注入电路集成在集成电路内部。但是，同样的方法仍然适用！图 5-1 显示了 D-CAP2 和 D-CAP3 转换器的环路波特图测试设置。

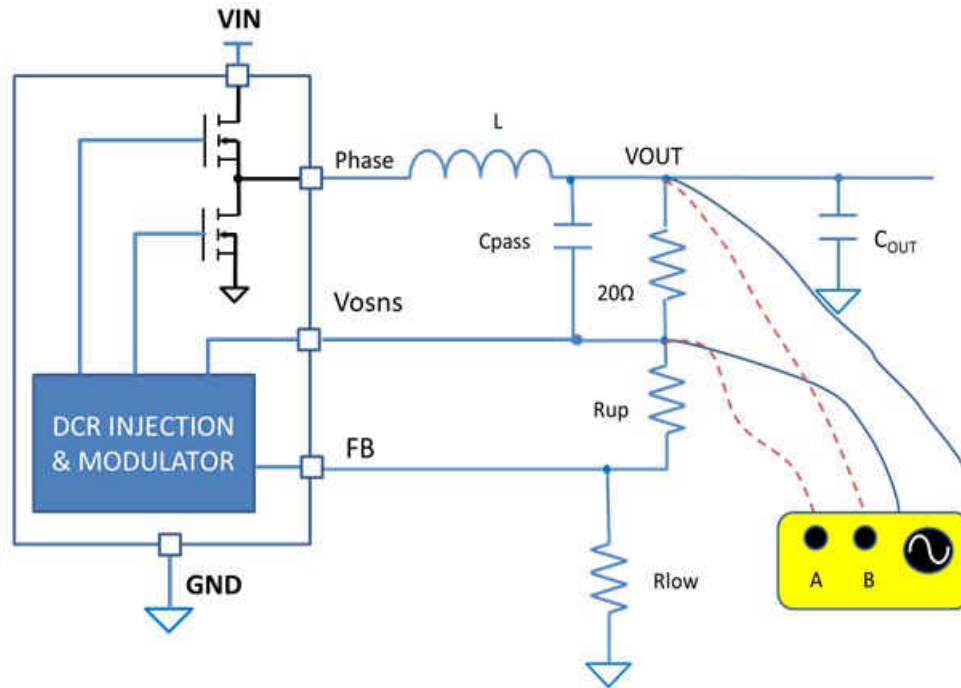


图 5-1. 正确的 D-CAP2 和 D-CAP3 控制环路波特图测量设置

## 6 测量技巧

要获得出色的波特图测量结果，请务必注意设置，并采取预防措施，以减少测量误差。下面是一些基本建议：

- 在进行测量之前，先校准网络分析器或进行 0dB 测量，以确保在目标频率范围内实现平坦增益和零相位。
- 使用控制器或转换器的模拟接地端作为波特图探头的参考。
- 让探头远离电感器，以避免将电感磁场信号耦合到交流注入幅度上。
- 如果可能，在负载连接处使用电阻功耗，而不是电子电流源模式。

## 7 总结

可以测量 DCAP、D-CAP2 和 D-CAP3 转换器的波特图。可以使用提供的方法来测量波特图，以确保系统稳定性，并将其用作优化负载瞬态性能的参考。要获得可靠的波特图结果来准确了解系统，请采取一些预防性设置步骤以尽可能减少误差。

本应用手册的作者对 Manjing Xie 在波特图测量方面所做的工作表示感谢。

## 8 参考文献

- 德州仪器 (TI)，[电源设计小贴士：连接电缆如何影响波特图测量](#)，Manjing Xie。
- 德州仪器 (TI)，[D-CAP3 - 超过原版的后续方案](#)，George Lakkas。
- 德州仪器 (TI)，[D-CAP 控制拓扑的设计优势](#)，Xiao Xu。

## 9 修订历史记录

<b>Changes from Revision * (May 2021) to Revision A (April 2023)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 向参考文献 添加了源和贡献信息.....	6

## 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