

Su Zehang

## 引言

在电力电子系统设计中，DC-DC 变换器的设计至关重要。传统仿真工具如 SPICE 虽然功能强大，但在处理开关电源这类强非线性系统时，常面临收敛慢、仿真时间长等问题。SIMPLIS ( SIMulation of Piecewise Llinear Systems ) 作为一种专为开关电源优化的仿真平台，采用分段线性建模方法，大幅提升了仿真速度与稳定性，成为电力电子工程师的得力工具。本文以 COT 控制为例，旨在指导工程师如何使用 SIMPLIS 完成 DC-DC 的设计与仿真。

## SIMPLIS 软件仿真优势

相比于传统的 SPICE 仿真，SIMPLIS 有两大特点，这些特点使设计和仿真开关电源的效率大幅上升，下面对其分别进行简单描述。

### SIMPLIS 分段线性化技术

SIMPLIS 将非线性元件 ( 如 MOSFET、二极管等 ) 简化为线性分段模型，仅在状态切换时求解电路方程。这种方式相比于 SPICE 的连续非线性求解方法，计算量减少 90% 以上。此外，SIMPLIS 支持固定时间步长仿真，避免变步长算法时容易出现的收敛问题。

### 专为电源设计优化的特性

为了方便电源设计，SIMPLIS 中内置电源设计常用的模块：如 PWM 控制器、磁芯元件库、补偿网络模板等。同时，SIMPLIS 会自动计算仿真模型的稳态初始条件，这使得它可以快速启动方案，减少仿真时间。此外，电源设计时常需要对系统进行频域分析检查环路稳定性，SIMPLIS 可以通过 POP ( Periodic Operating Point ) 分析直接获取小信号模型而无需对电路原理图本身做大量改动。

## D-CAP™ 控制概述

在 2004 年，TI(Texas Instruments)的 TPS51116 首次实现了 D-CAP™ 控制拓扑结构。D-CAP 技术作为一种电流模式控制方法，利用输出电容的等效串联电阻 ( ESR ) 作为感测元件。"D-CAP"这个名字本质上是指直接通过输出电容采集电流信息。经过二十余年的发展，TI 已经拥有一系列适用不同调制器的 D-CAP 芯片，例如 D-CAP2™ 和 D-CAP3™ 等控制模式。图 1 展示了 TI D-CAP™ 系列产品的发展历程。

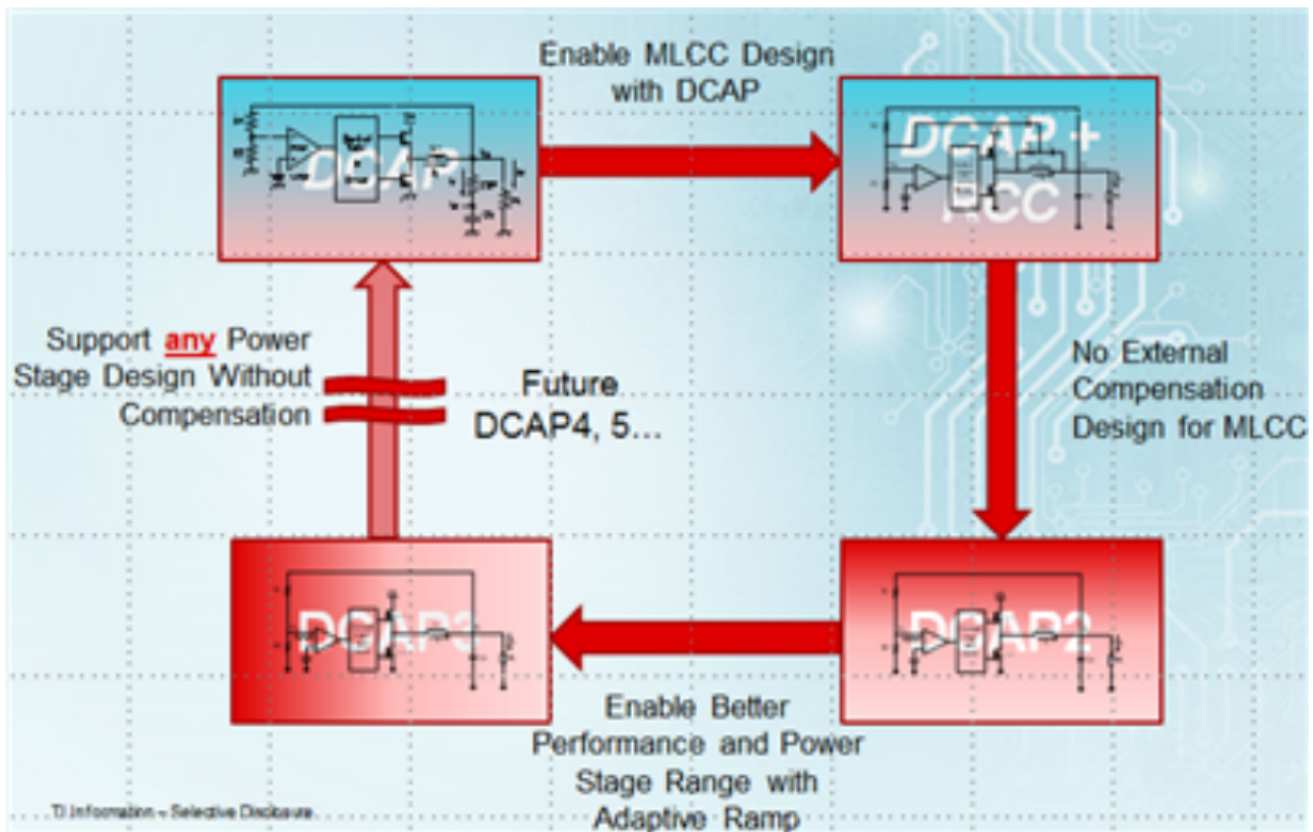


图 1. TI D-CAP™发展历程

图 2 展示了 COT 控制的框图，COT 控制利用输出电压纹波作为 PWM 斜坡信号，该斜坡信号与芯片内部的参考电压比较实现对输出电压的调制。相较于电压模式和电流模式，该控制具有多项优势。首先，它不需要环路补偿网络，使设计更为简便。其次，由于不再使用误差放大器进行电压调节，因此能够实现快速的瞬态响应，这点在快速响应的应用中格外重要。此外，它在轻载条件下实现了从 PFM 模式无缝过渡到重载状态下的伪 PWM 模式，如图 3 所示。

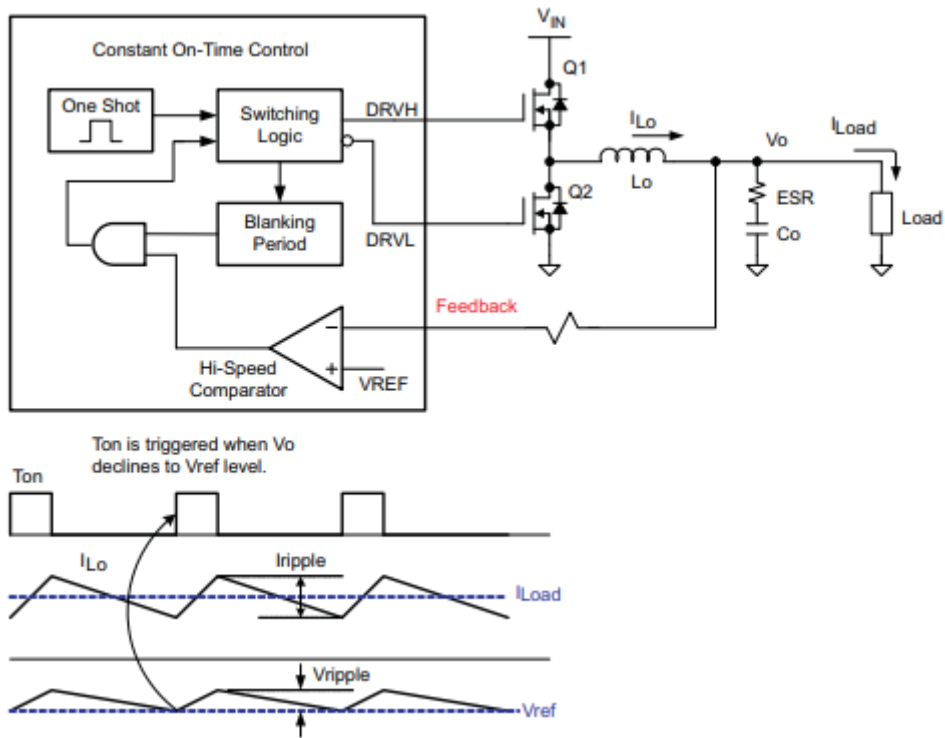


图 2. COT 控制基本原理

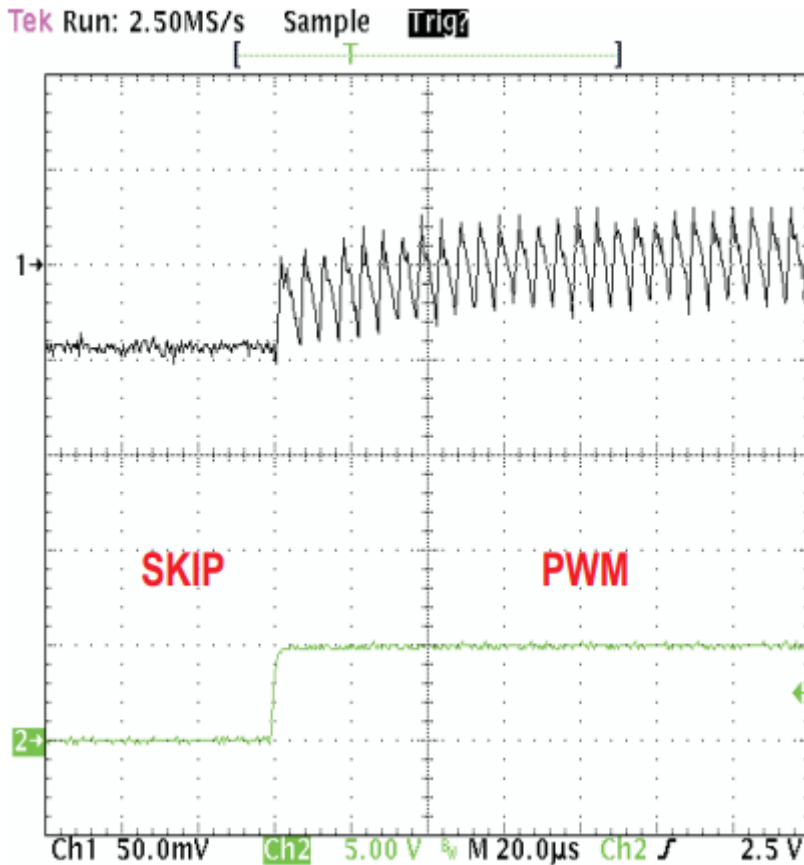


图 3. COT 控制的模式切换

然而，传统的 COT 控制，开关频率会随输入电压和负载状况变化，使得这种控制模式在很多应用中面临挑战。TI 的 D-CAP™ 模式(自适应导通时间控制)能够根据输入电压、输出电压和负载电流动态调整功率管导通的时间，从而实现相对恒定的开关频率。它不仅继承传统 COT 控制方案的优点，也通过相对恒定的开关频率，从而最大限度地减少系统中某些敏感频段的 EMI 问题。图 4 展示了使用 D-CAP™ 控制模式的 Buck 电路的简化框图。

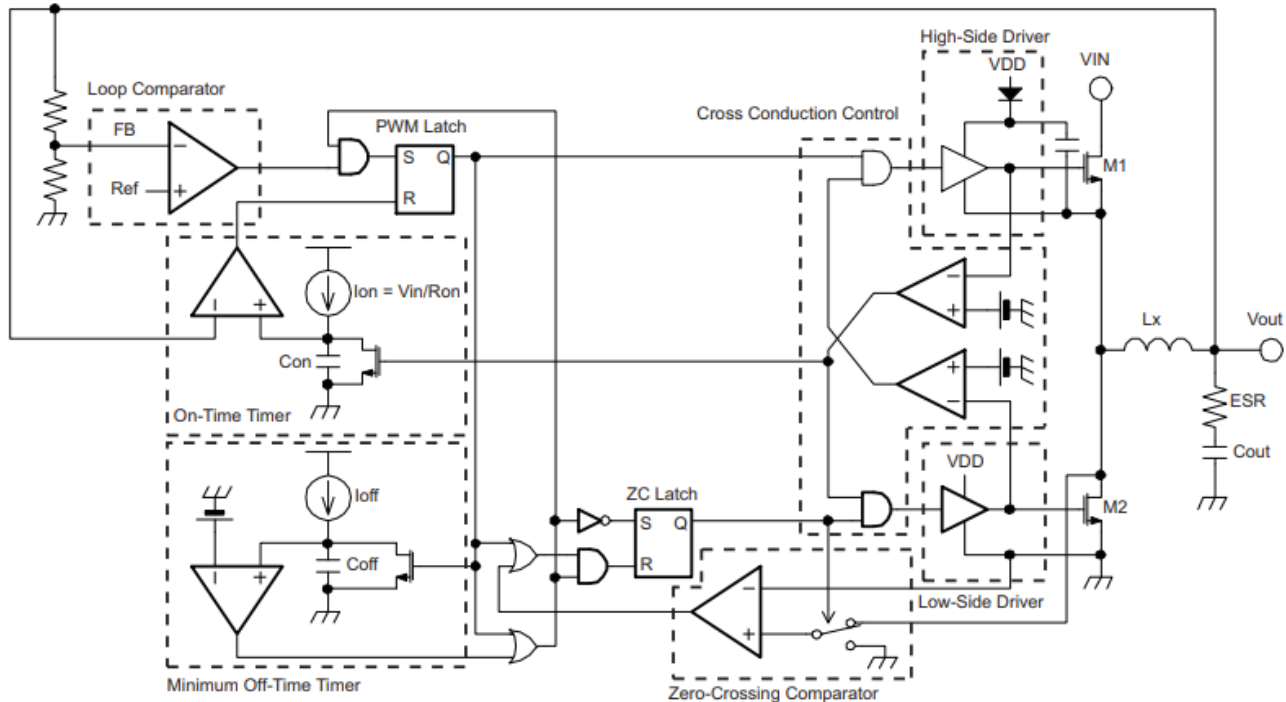


图 4. D-CAP™ 控制模式 Buck 电路框图

### 使用 Simplis 完成电路设计与仿真

本章节以经典 COT 控制为例描述使用 SIMPLIS 完成电源设计与仿真的步骤。

#### 使用 SIMPLIS 完成电路设计

图 5 展示了该设计的原理图。两个“压控开关” S1 和 S2 作为 Buck 电路中的两个功率管，该开关可以设置开关的导通电阻，关断电阻，开启阈值电压和迟滞量，这些参数可以模拟实际应用中开关管的常用特性，开关的设置如图 6 所示。D1,D2 作为功率管的寄生体二极管。L1,C3 分别为电感和输出电容, R2 为输出电阻的等效串联电阻 (ESR, Equivalent Series Resistance。需要注意的是，在经典 COT 控制中，ESR 的阻值是环路稳定性的重要条件，过小会导致系统出现次谐波振荡；R6 为电阻负载；R3 和 R2 作为反馈网络，将输出电压反馈至控制电路。

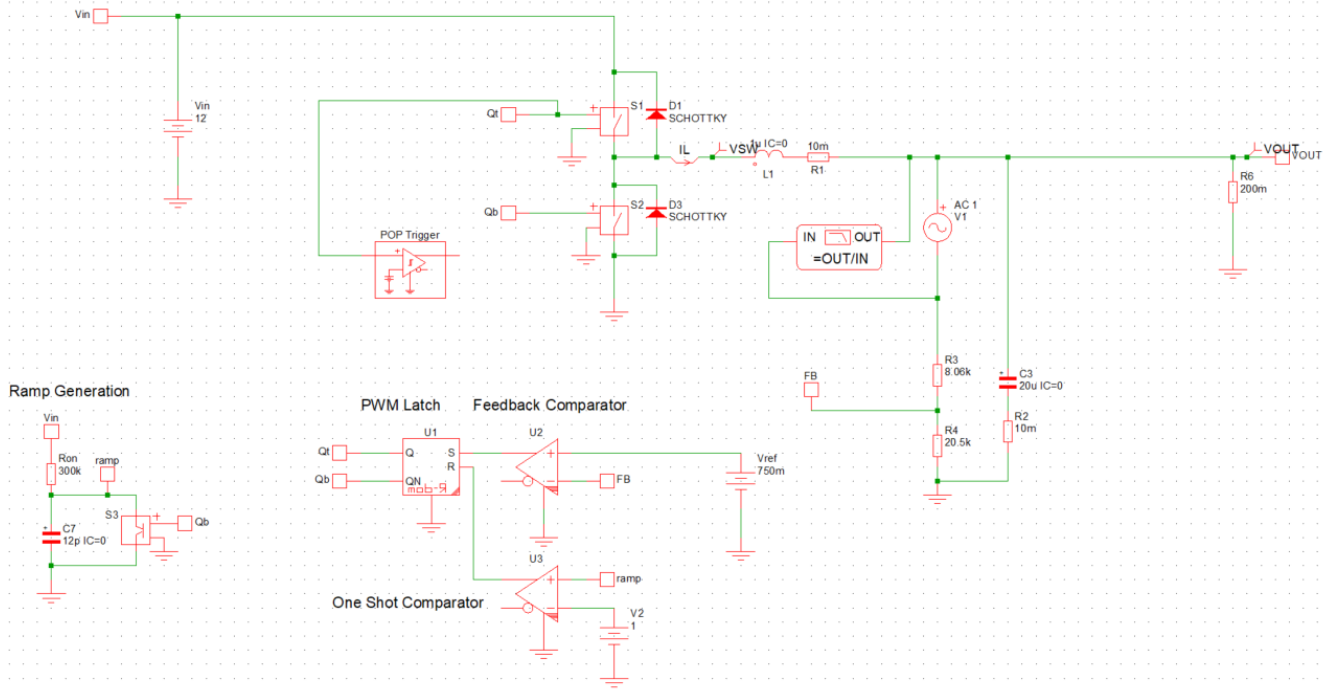
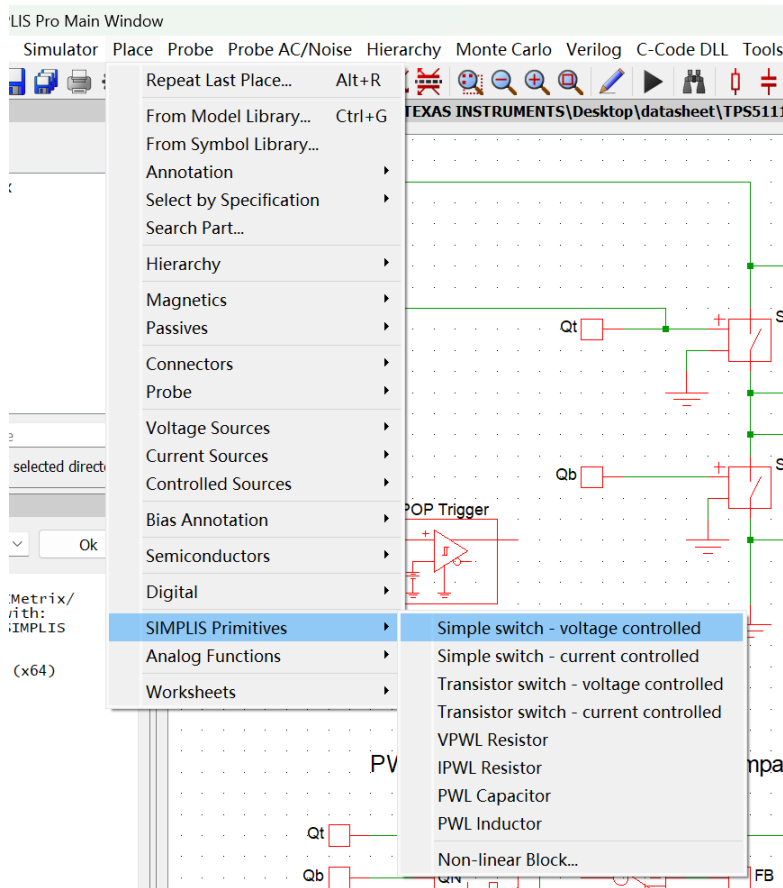


图 5. COT 控制 Simplis 原理图



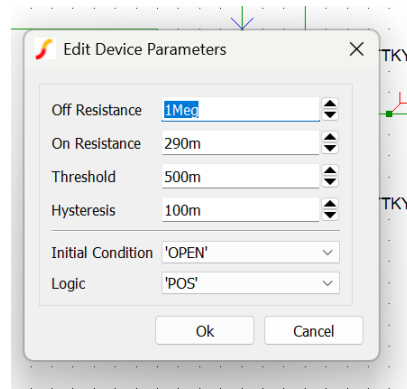
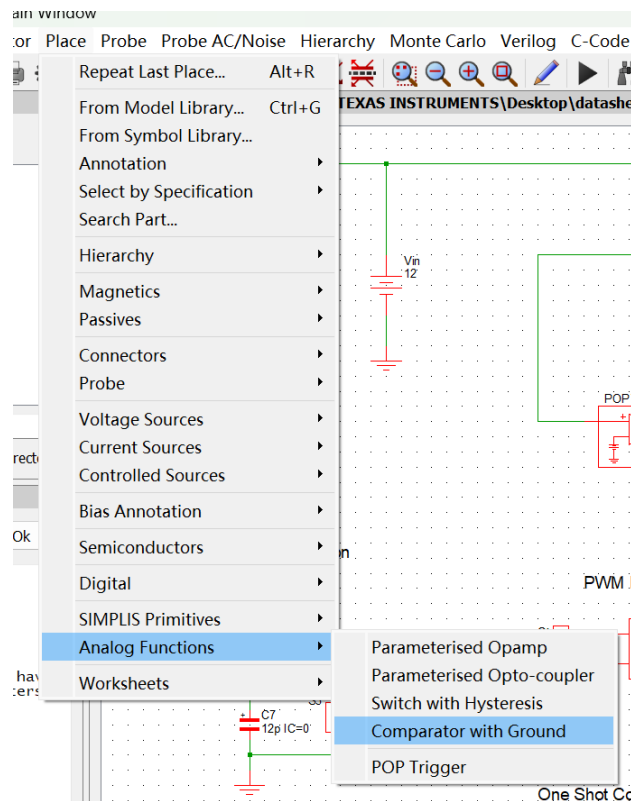


图 6. 压控开关设置

U1, U2, U3, S3 作为控制回路的核心部分，包括反馈比较器，PWM 触发器，Ramp 产生电路，共同实现环路控制，比较器的选取和设置如图 7，可以设置比较器的输入特性（延迟，迟滞，输入阻抗）和输出特性（输出阻抗，输出电压），同样的 SIMPLIS 也为 RS 触发器提供了诸多设置项，如图 8 所示。



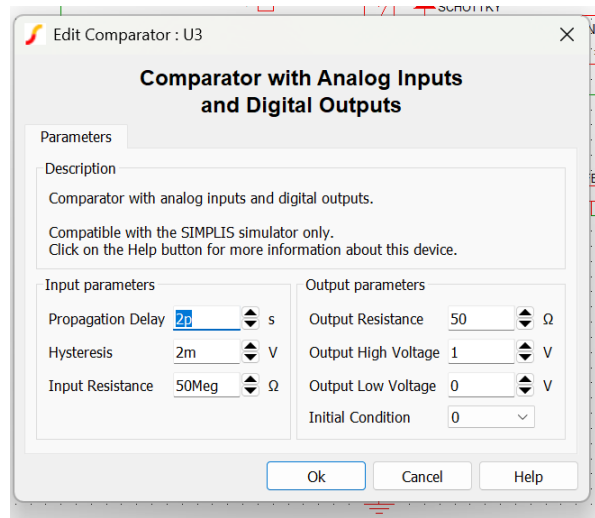


图 7. 比较器设置

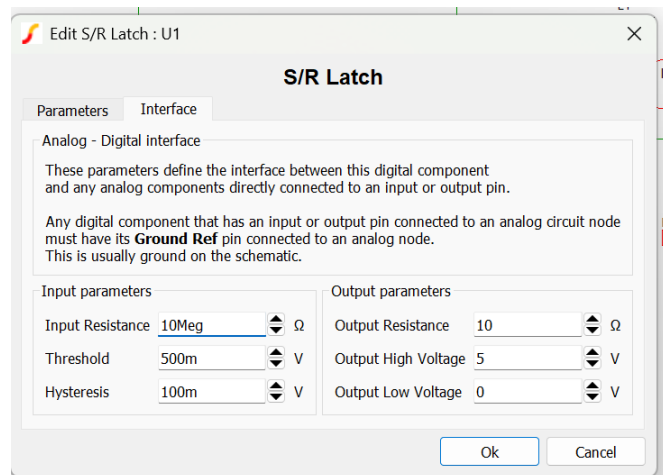
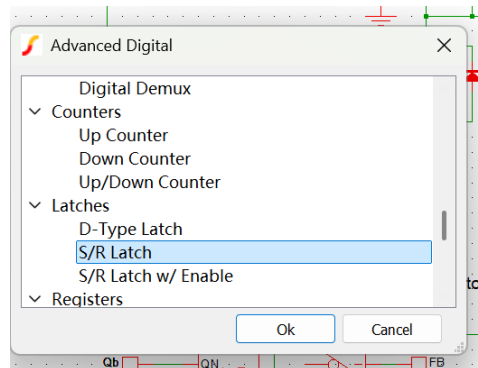


图 8. RS 触发器设置

### 使用 SIMPLIS 完成电路仿真

对于 DC-DC 的仿真，最常见的有瞬态和 AC 仿真两种，这两种仿真分别在时域和频域层面验证系统的性能与稳定性。两种仿真都需要在电路回路中添加 POP Trigger 实现，否则极易出现仿真不收敛，图 5 中已经标出了 POP Trigger 的位置。POP Trigger 的选取与设置方法如图 9 所示。需要特别注意的是，POP Trigger 中的 Maximum period 设置项至少要达到 2 倍的开关周期，如图 10 所示。

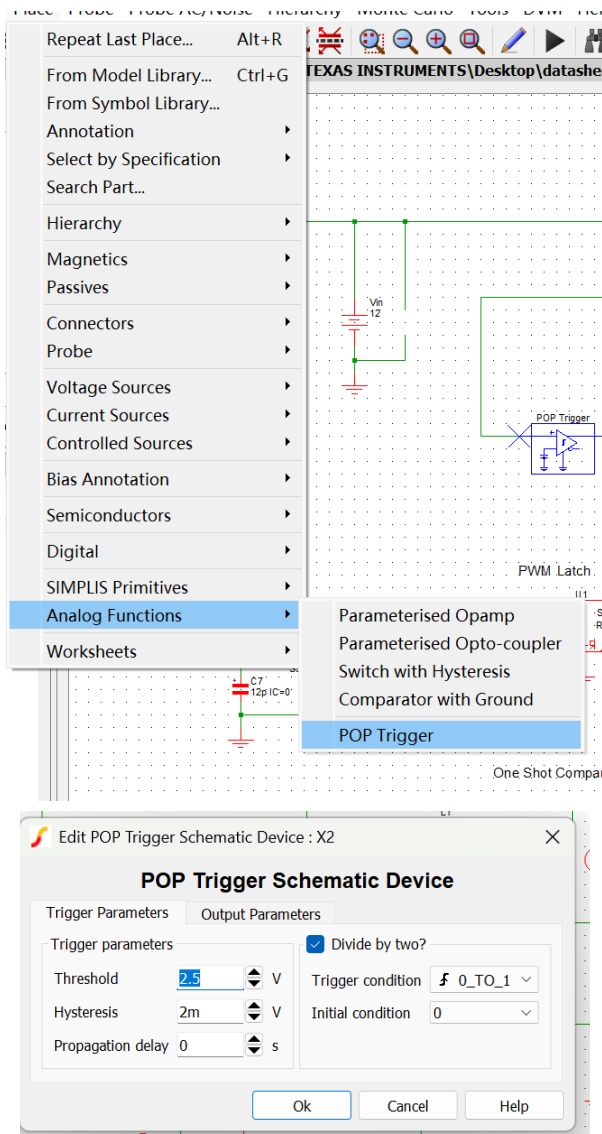


图 9. POP Trigger 选取

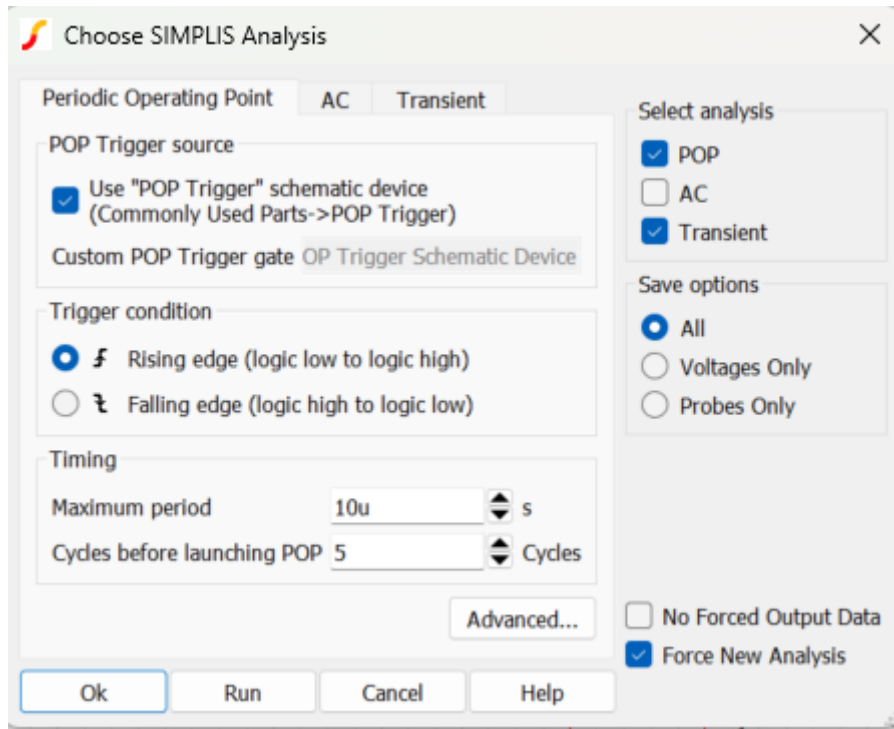


图 10. POP Trigger 中的 Maximum period 设置项

对于瞬态仿真，可通过 SIMPLIS 内置仿真器实现，仿真器设置如 图 11 所示，我们可以设置仿真的停止时间，也可以设定保存仿真数据的时间以优化仿真效率，例如只想看稳态时的数据，而不看刚上电时的情况，就可以通过设定保存数据的起始时间来加快效率。保存的数据可以保存所有点，也可以通过使用电压探针和电流探针的方式来选取重点关注的点位，在面临大规模电路仿真时可以优化效率。在  $V_{IN}=12V$ ,  $V_{OUT}=1.05V$ ,  $I_{OUT}=5A$ ,  $F_{SW}=480KHz$  条件下，图 5 设计的仿真的结果如 图 12 所示，其分别显示了输出电压，电感电流与 SW 波形。这些波形可以帮助工程师在时域中检查设计是否达到设计目标。

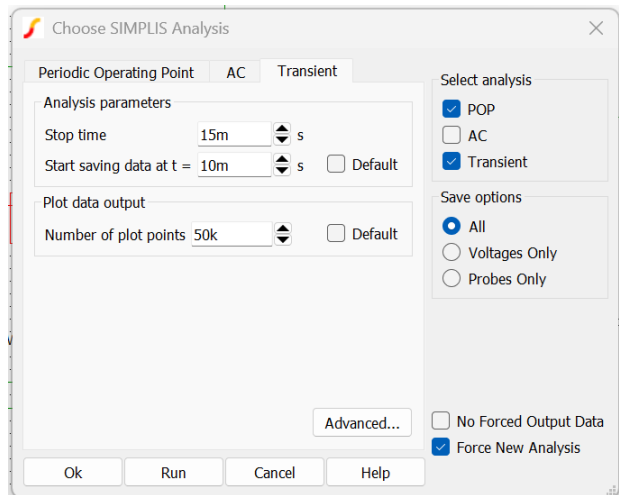


图 11. 瞬态仿真仿真器设置

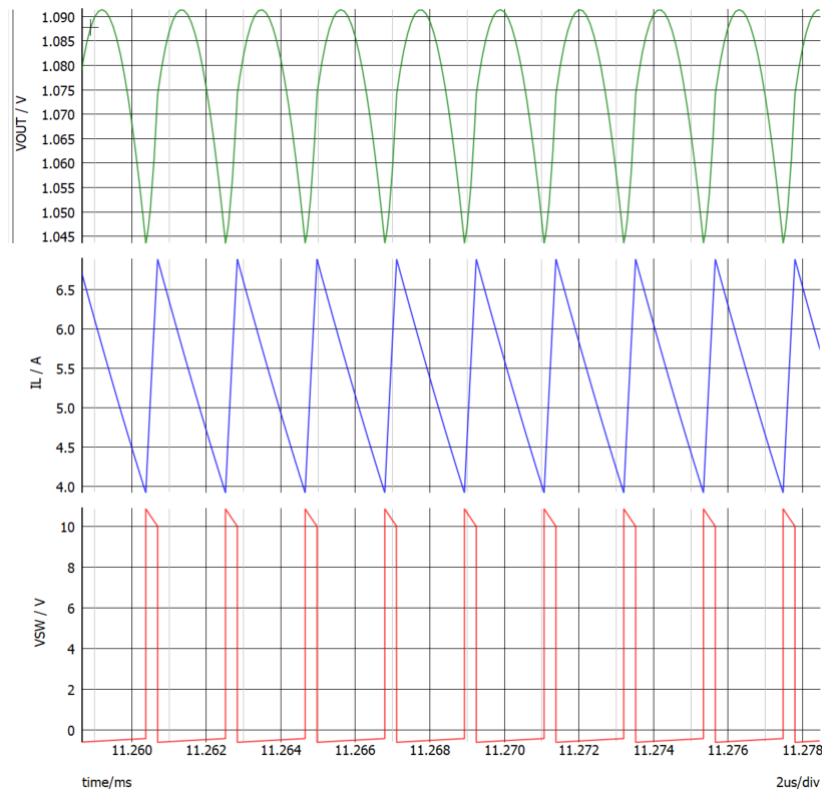


图 12. 瞬态仿真波形图

对于 AC 仿真，需要在原理图中添加示波器与 AC 信号源，两个器件的添加方式可参考图 5 的原理。示波器的设置如图 12 所示，为了使得看到的波形与传统的波特图保持一致，建议设置时将增益单位设置为 dB，并将增益曲线和相位曲线分开显示(即 two grids)。在该设计中仿真的结果如图 13 所示，可以显示常用的相位裕度，GBW 等参数。

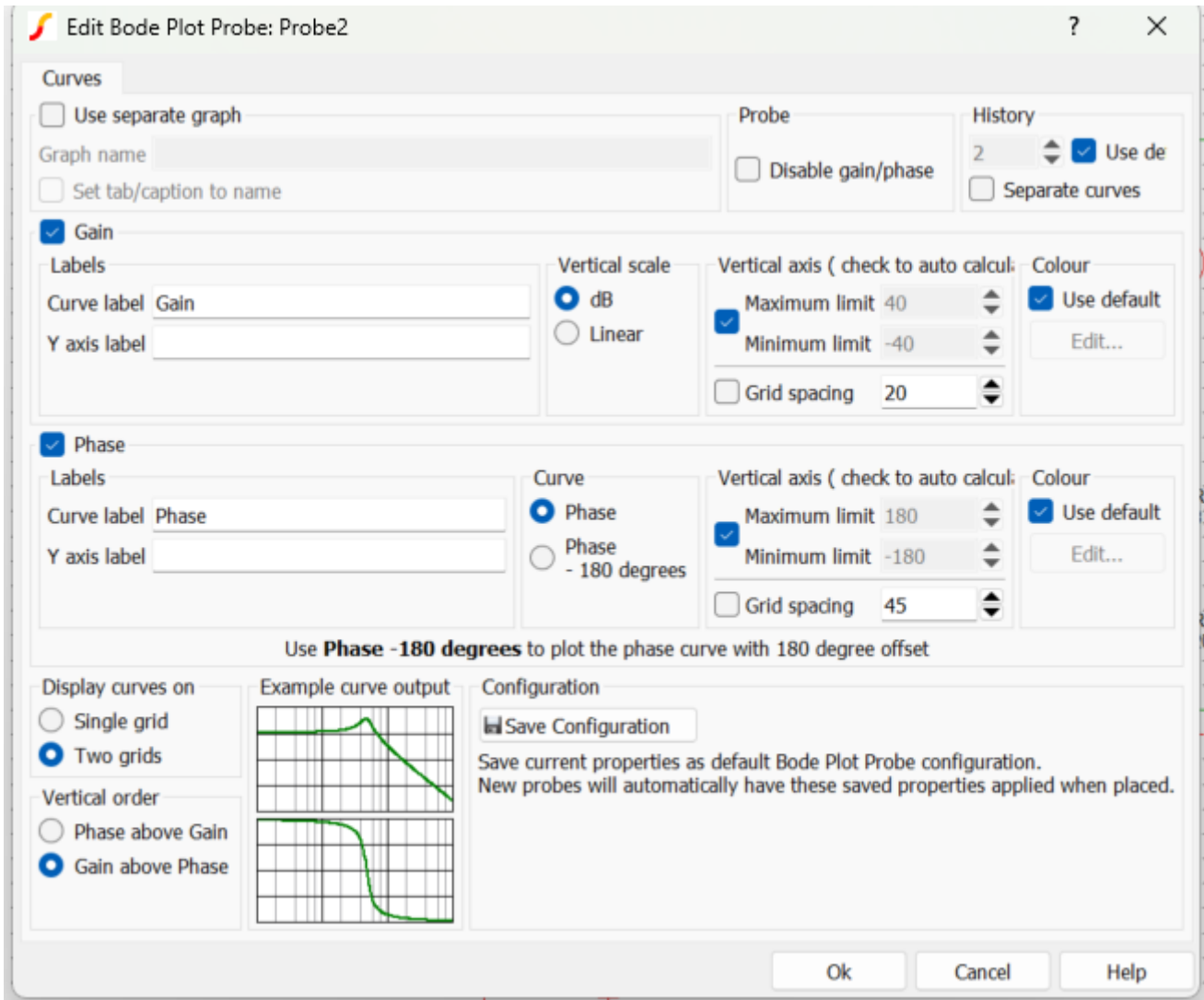


图 13. AC 仿真示波器设置

对于 AC 仿真的仿真器设置，同样可以设置起始频率，停止频率，以及仿真点的数量，设置的数量越多精度会更高，但会延长仿真时间。

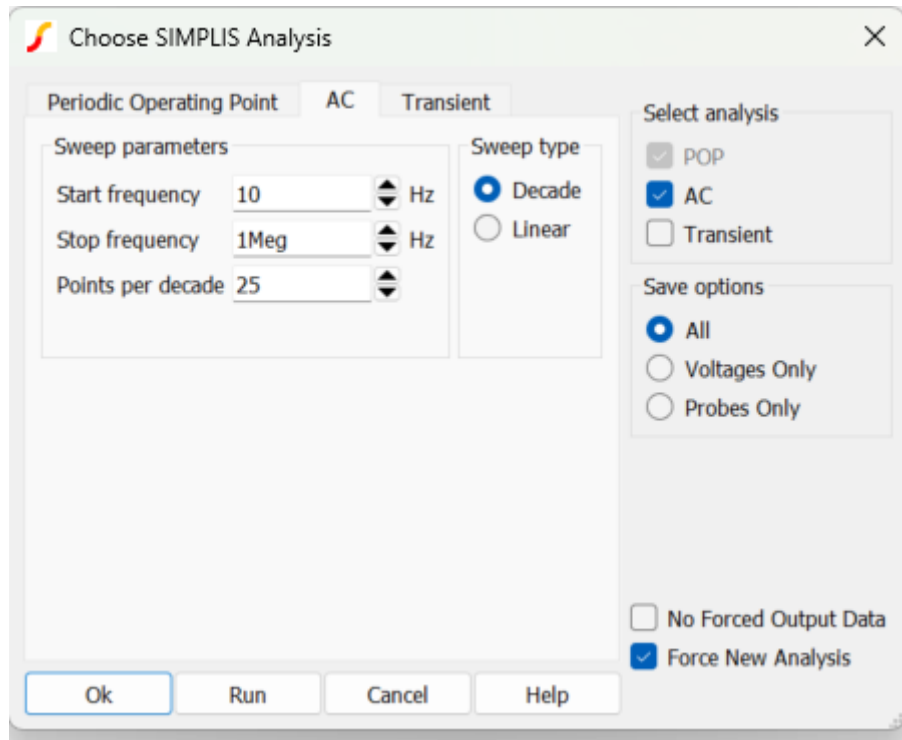


图 14. AC 仿真器设置

启动仿真器并稍作等待，SIMPLIS 会自动显示 AC 仿真的结果，其结果如 图 15 所示，通过之前对示波器的设置，最后体现的波特图可读性会更好。我们可以通过 图 16 所示的方式激活光标对低频增益, GBW, 相位裕度等关心的参数测量，光标无论是瞬态仿真还是 AC 仿真都可以使用。

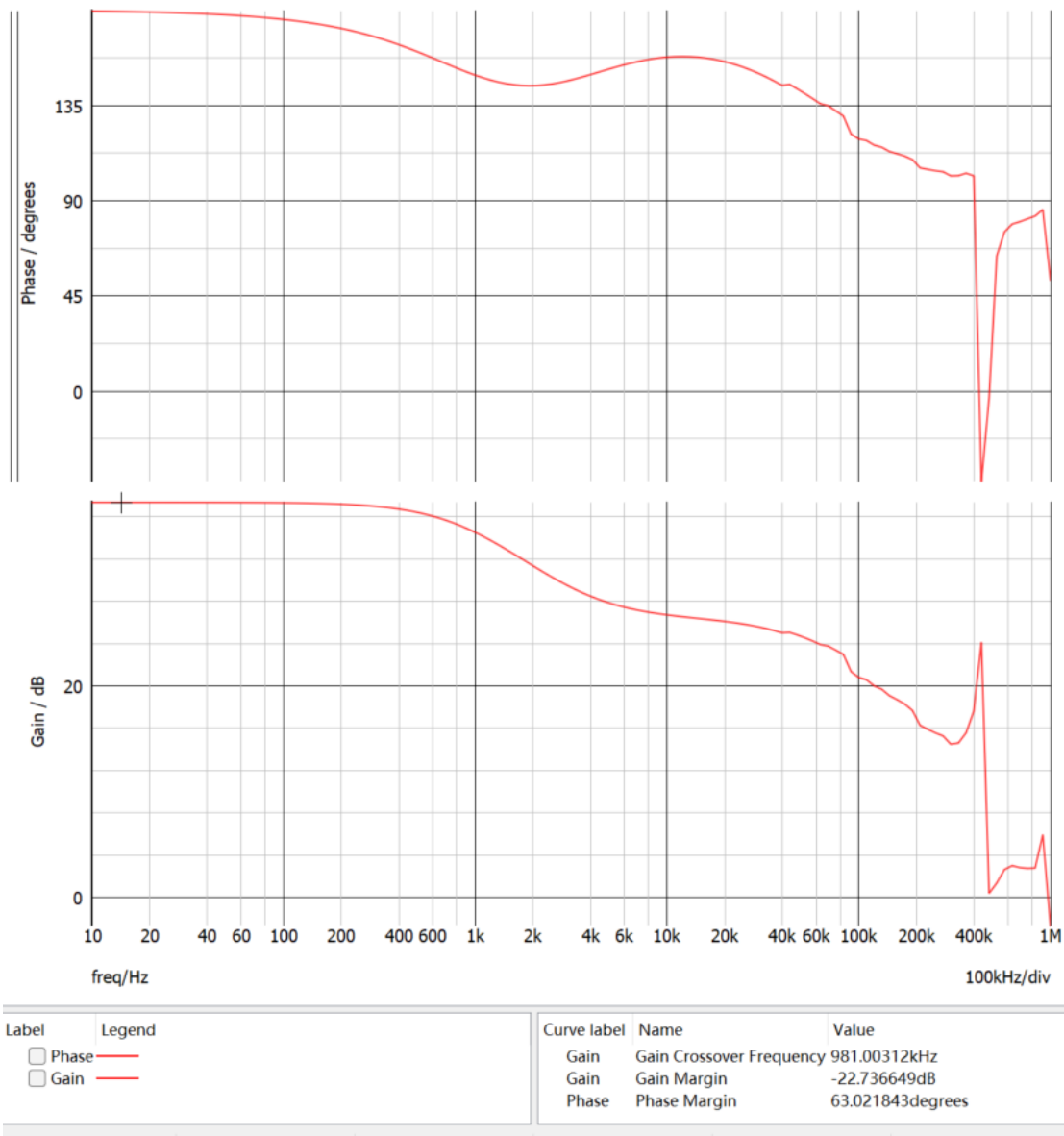


图 15. AC 仿真波特图

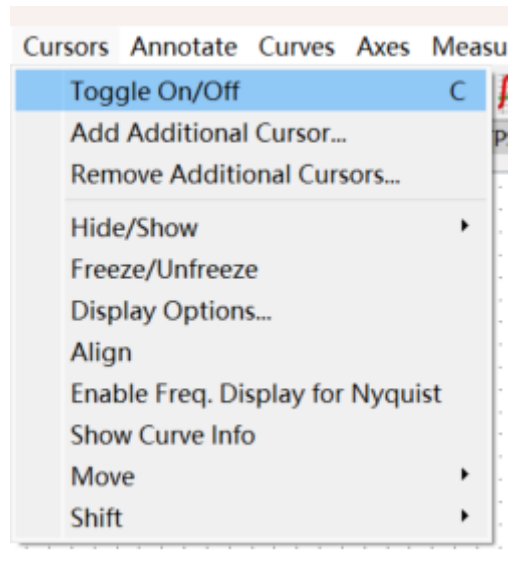


图 16. 激活光标

同时，与真实的示波器类似，SIMPLIS 也提供了自动测量的功能，通过自动测量，我们可以更精确的得到所关心的指标，启用测量功能的方式如 图 17 所示。除了一些基本的测量功能（最大值，最小值，频率等），在更多功能中我们可以找到针对 AC 仿真的一些参数，包括但不限于相位裕度，穿越频率等。这些可以帮助工程师更方便、更准确的评估自己的设计是否达到了设计指标的要求。

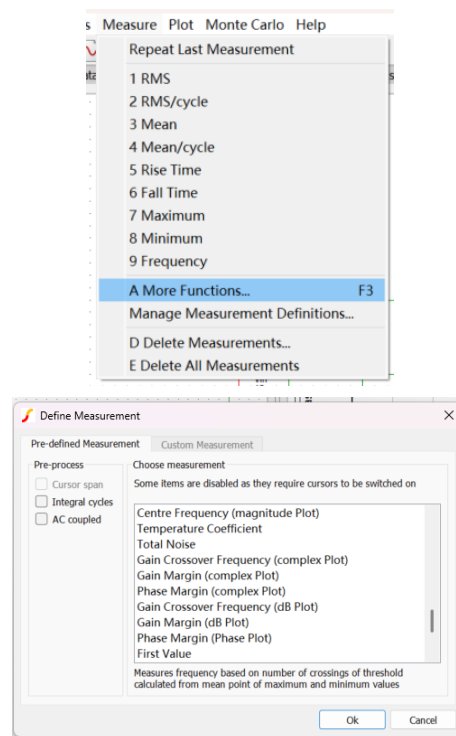


图 17. 使用测量功能

## 总结

本文首先简述了 SIMPLIS 的特点以及在开关电源系统设计领域所具有的独特优势。并以 COT 控制电路为例描述了如何搭建原理图、如何实现瞬态和 AC 仿真、在设置中需要关注的若干注意事项等。SIMPLIS 作为一款功能强大的仿真软件，也有许多本文尚未提到的功能，读者可以通过 SIMPLIS 官网中提供的资料进一步学习了解。

## 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