

Technical Article

潜在的固件错误可能会导致控制不稳定



Desheng Guo 和 Aki Li

在设计诸如升压功率因数校正 (PFC) 之类的数字电源时，您是否见过类似图 1 中的电流振荡？

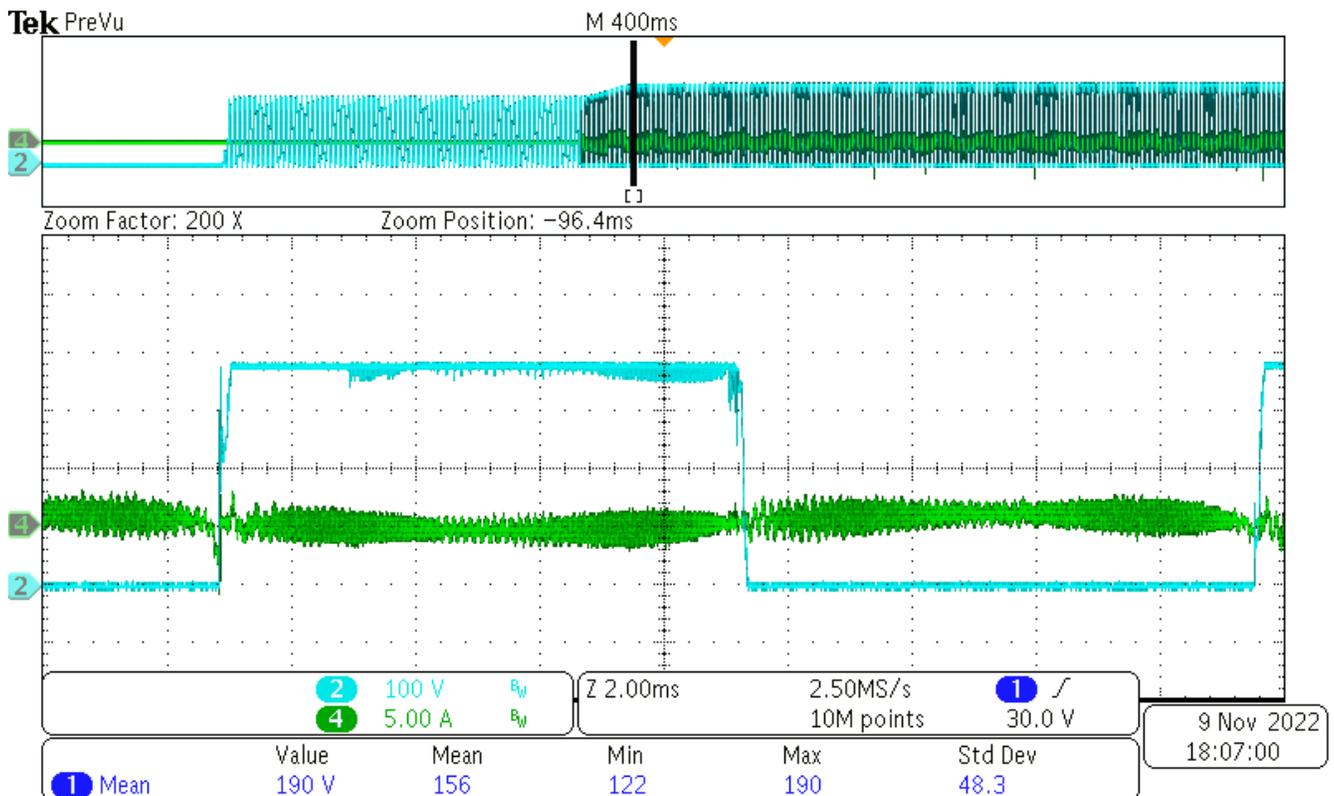


图 1. 电流振荡发生在 PFC 级。来源：德州仪器 (TI)

您可能认为这种不稳定振荡由过快的控制带引起，因此您减小比例积分 (PI) 控制器的比例增益 (K_p) 和积分增益 (K_i)，并显著降低交叉频率。振荡就会消失。

但这是最佳解决方案吗？较低的电流环路带宽会降低控制速度，但您可能会发现总谐波失真 (THD) 测试将会失败。有时，当源阻抗大一些时，振荡会再次出现。

这种不稳定性是否可能有其他原因？如何以足够的相位裕度实现最佳控制带宽？下面我们来详细分析一下数字控制环路，从而了解这一潜在的错误是如何引入的。我们还将向您展示如何检查控制固件中是否出现这种不稳定性。

基于 MCU 的数字控制

图 2 展示了基于 MCU 的数字控制系统。

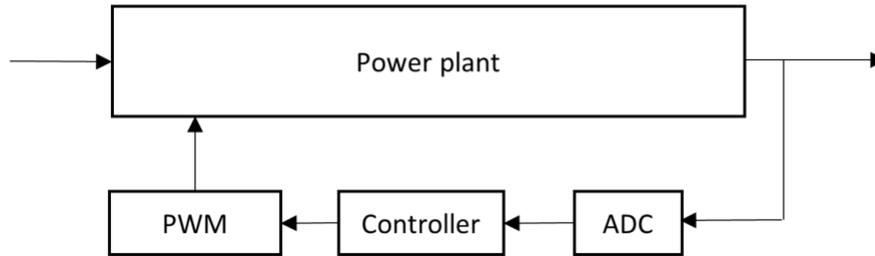


图 2. 数字控制系统围绕微控制器构建而成。来源：德州仪器 (TI)

控制环路包含一个模数转换器 (ADC) 用于进行对象电流/电压采样，一个数字控制器用于生成调整值，以及一个脉宽调制器 (PWM) 用于执行调整，可通过更改占空比或频率来改变目标电流/电压。

开关模式电源 (SMPS) 中的 ADC 采样通常位于两个开关周期的中间点，这样不仅可以避免开关产生的噪声干扰，还可以获取连续导通模式 (CCM) 下功率电感器的平均电流值。

数字控制器在中断服务例程 (ISR) 中进行计算，可以与 PWM 输出同步触发。触发事件可以是以下事件之一：PWM 的“COUNTER”等于“ZERO”、“PERIOD”或特定的值“CMP”。

控制器完成所有计算时无法立即更新 PWM，但 PWM 寄存器必须在一个专门时刻由影子寄存器加载，如 PWM 计数器等于“ZERO”或“PERIOD”时。如果 PWM 值在计数器上升或下降过程中发生变化，则很可能产生错误的 PWM 动作，导致脉冲丢失或脉冲重复。

与模拟控制系统不同，数字控制按照采样频率来执行，并且从采样到 PWM 重新载入新值必须有一个延迟时间 (T_d)。PWM 修改通过调整翻转时刻来实现，翻转时刻在单边沿调制时 (递增/递减模式) 发生一次，在双边沿调制时 (先递增后递减模式) 发生两次。因此，最小 T_d 将会是一个开关周期 T_s (如图 3a 所示)，或半个开关周期 $T_s/2$ (如图 3b 所示)，具体取决于您选择的调制重新加载频率。

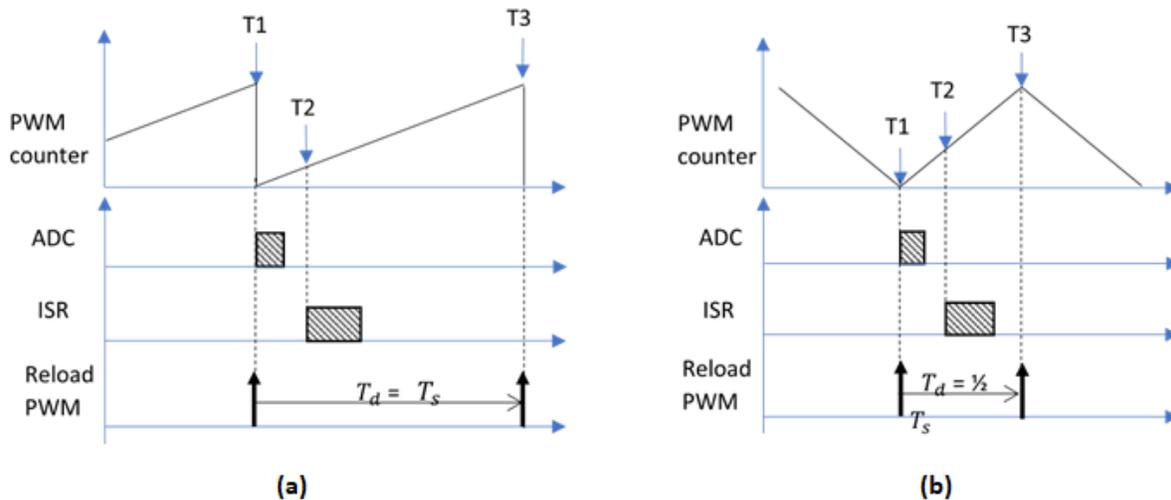


图 3. 最小延迟时间通过 PWM 调整而引入：(a) 向上计数模式，(b) 上下计数模式。来源：德州仪器 (TI)

如图 4 所示， T_d 在其传递函数中表示为 e^{-sT_d} ，这将减少相位裕度。当然，当相位裕度小于 45 度时，系统将变得不稳定，并会发生振荡。

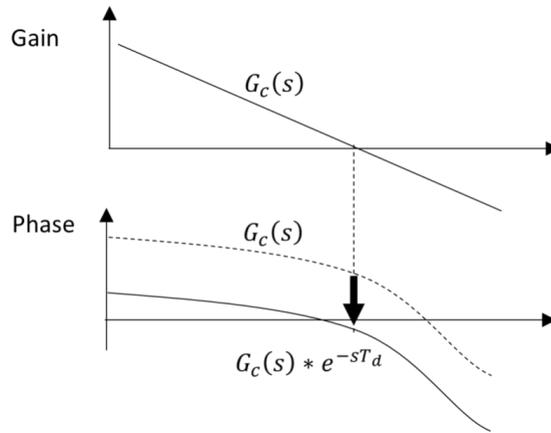


图 4. 波德图中显示了延时时间的影响。来源：德州仪器 (TI)

数字控制实现中的潜在代码错误

在正确执行的情况下，最小 T_d 为一个开关周期 T_s 或半个开关周期 $T_s/2$ 。但是，如果未考虑 ADC、ISR 和 PWM 重新加载的后果，则将控制延迟扩展到高于一个开关周期可能会减小相位裕度，导致不稳定。

例如，在图 5 中，当 PWM 计数器等于零，ADC 的 ISR 触发和 PWM 重新加载会同时启动。

尽管所有块都同时执行，但在这种情况下，您是否可以预期 T_d 为零？当然不能！

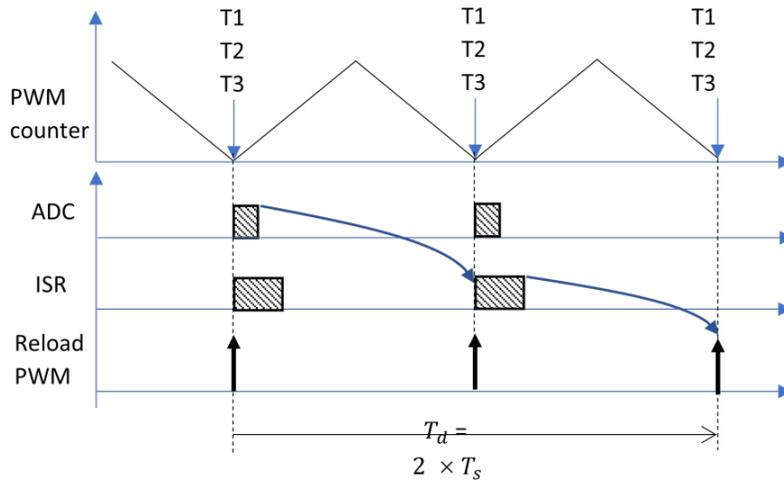


图 5. 此处是一个会引入较大延迟时间的错误代码示例。来源：德州仪器 (TI)

这是因为 ADC 转换和 ISR 计算所需的时间远超一个 MCU 时钟周期，当 ISR 读取 ADC 结果时，ADC 转换仍未完成。因此，ISR 将获取“旧”采样值进行计算，而最新值的计算将延迟到下一个开关周期。ISR 计算完成后，新 PWM 值仅写入影子寄存器中，随后将在下一个开关周期中重新加载。实际上， T_d 的总控制延迟将为两个开关周期，即 $2 \times T_s$ 。

除了此处所示的示例之外，其他实现方案也可能会引入类似的扩展控制延迟，例如，在 ISR 代码中将 ADC 值读取放在控制器计算之后，或者在计算控制器之前添加 N 周期算法平均值。

如图 6 所示，在图 5 的错误实现中，如果将 GAIN 交叉频率设置在 3kHz 左右，则相位裕度为 41.68 度。此值小于 45 度，并且扼流电流有明显的振荡，比如图 1 的波形，因此您被迫将交叉频率降至低于 2kHz；然后 iTHD 更差，无法满足要求。

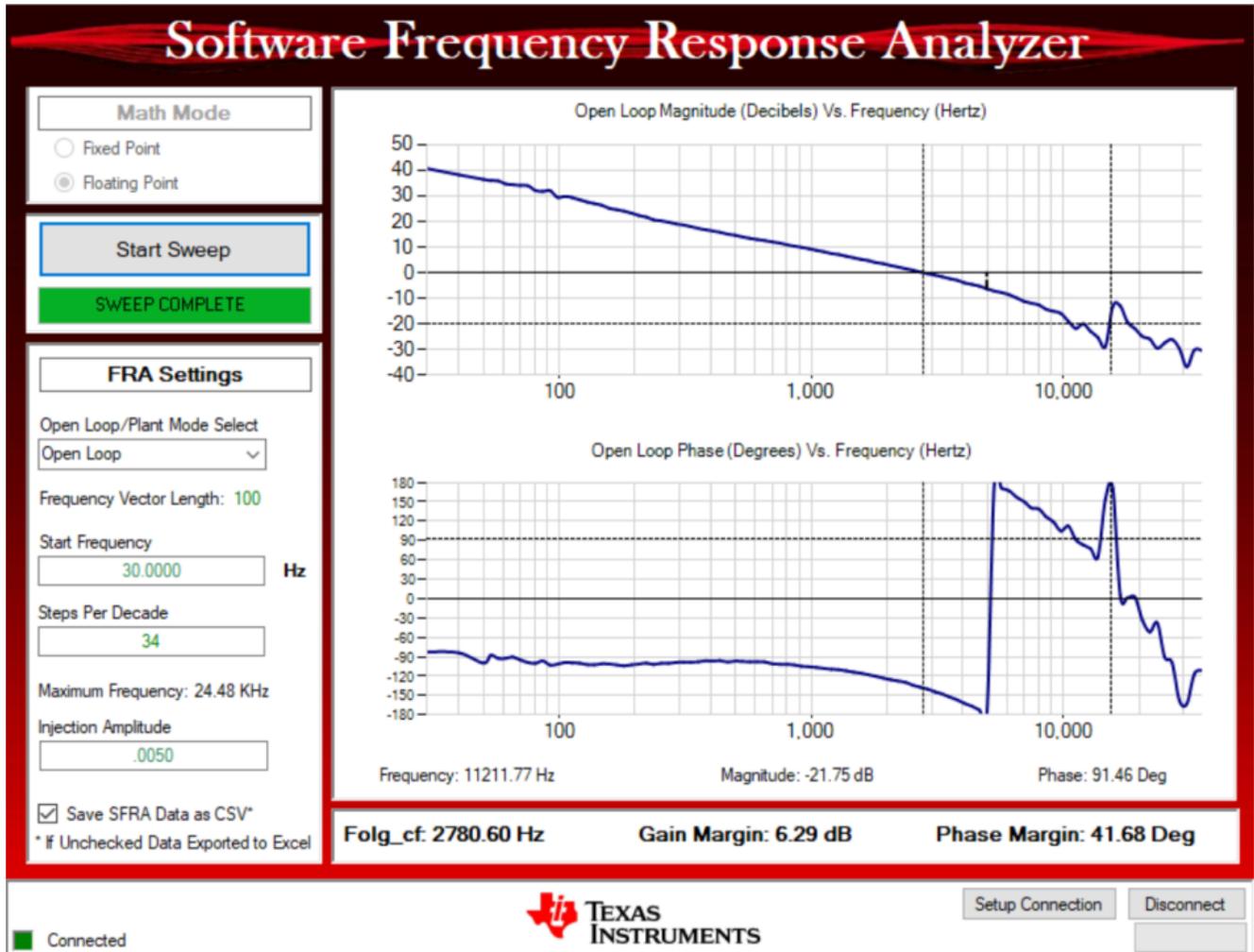


图 6. 错误代码实现下的波德图。来源：德州仪器 (TI)

设计解决方案

此问题可以轻松解决，只需将 ADC 转换移动到 $COUNTER = PERIOD$ 的时刻，并且使 PWM 重新加载在下一个 $COUNTER = PERIOD$ 时刻发生，如图 7 所示。

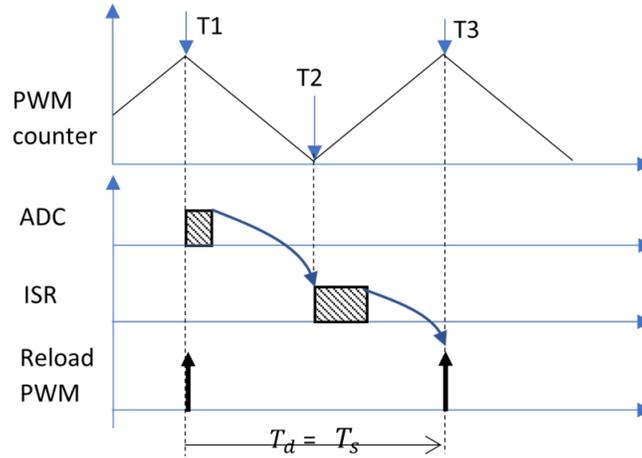


图 7. 通过改进代码可减少控制延迟。来源：德州仪器 (TI)

控制延迟将减少为一个开关周期。相位裕度显著增加，电流振荡消失，如图 8 和图 9 所示。

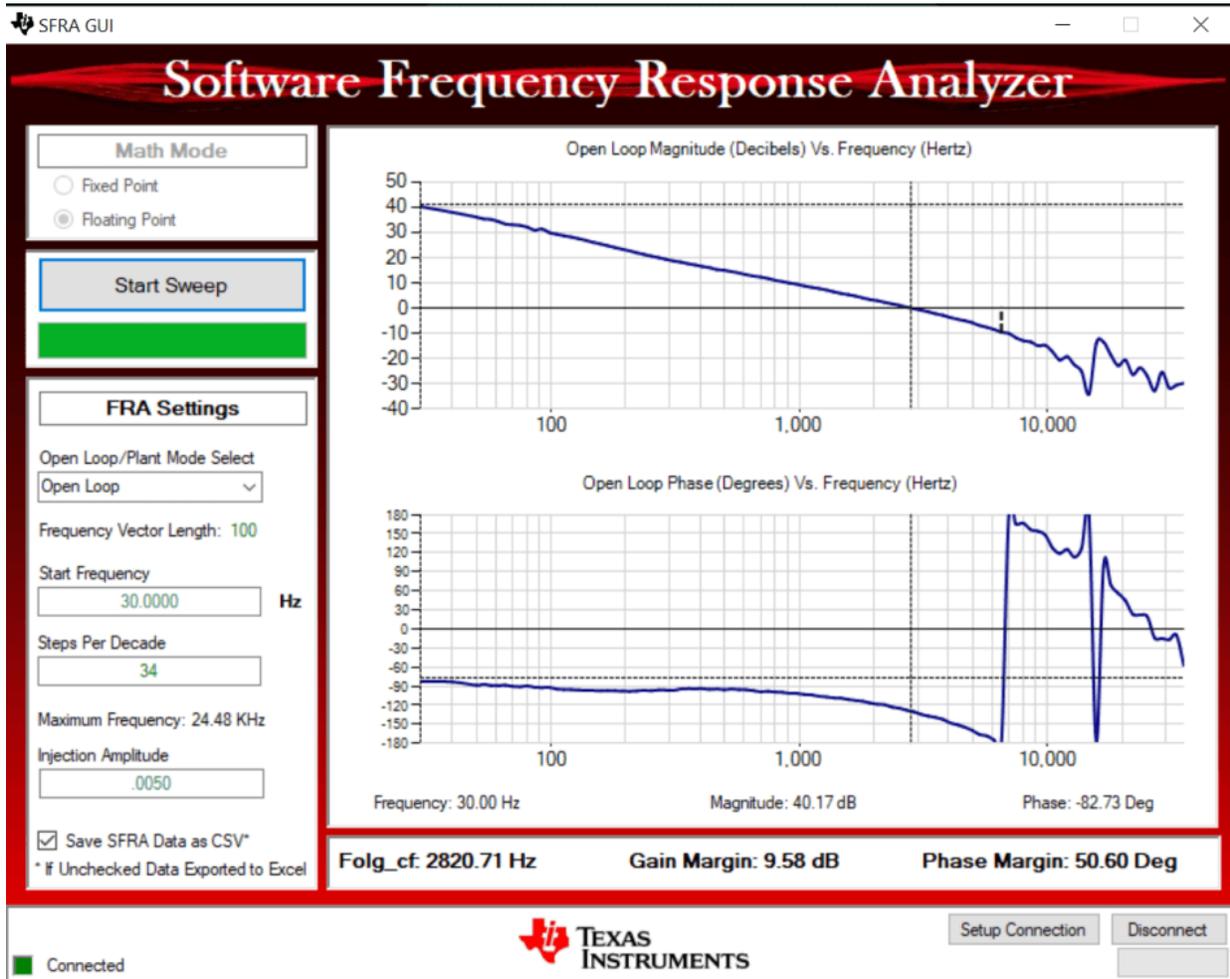


图 8. 改进代码后的波德图。来源：德州仪器 (TI)

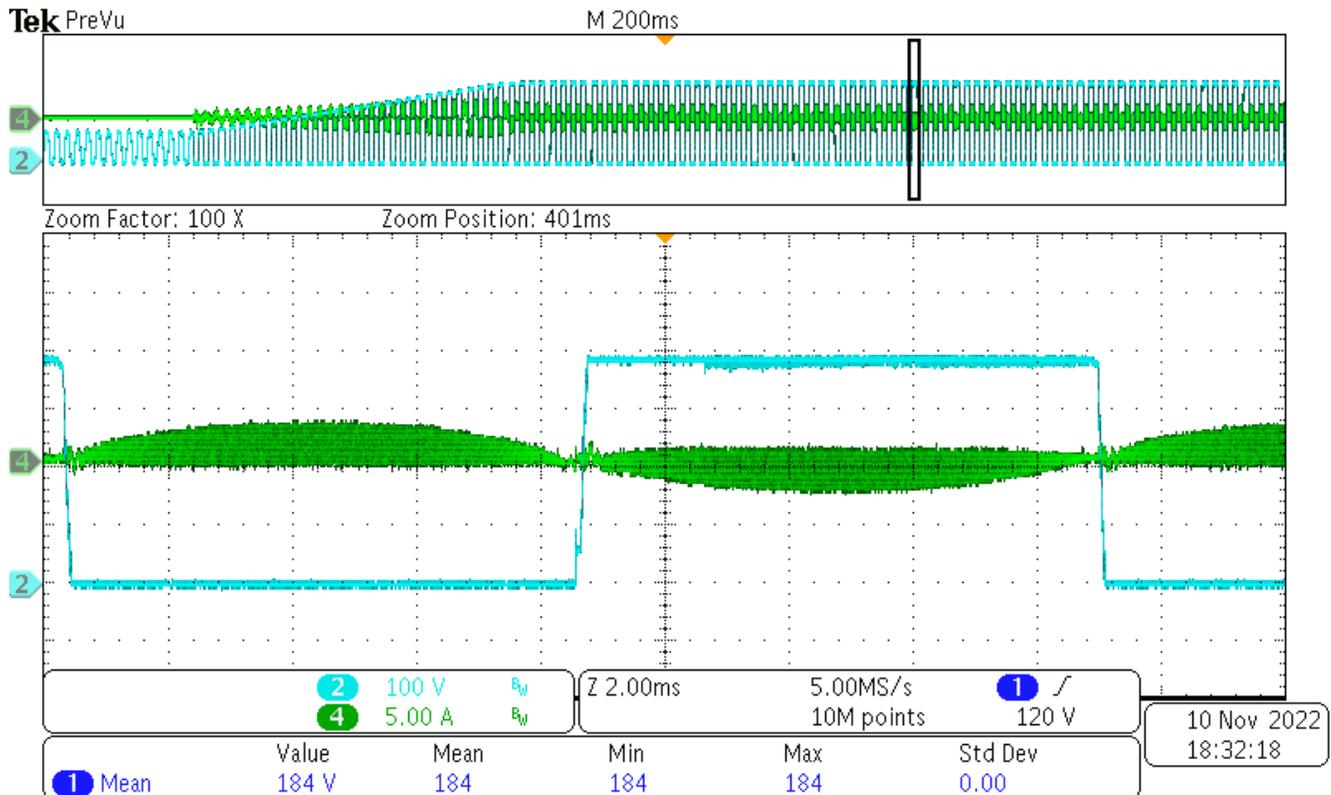


图 9. 改进代码后的波形。来源：德州仪器 (TI)

组织有序的控制方案

在数字实现中，从 ADC 采样到 PWM 调整的控制延迟将减小相位裕度并导致振荡。解决该问题时，应考虑 ADC 采样、控制器计算和 PWM 重新加载的后果。组织有序的控制方案可以将延迟尽可能减少到半个或一个开关周期，从而增加相位裕度和环路带宽。

相关内容

- [电源设计小贴士 113](#)：两个可实现 8W 或更低功率的简单隔离式电源选项
- [电源设计小贴士 112](#)：用于故障测试的板载装置
- [电源设计小贴士 111](#)：为什么电流检测在协作式移动机器人中必不可少
- [电源设计小贴士 110](#)：寄生效应如何会产生意外的 EMI 滤波器谐振
- [PID 设计的基础知识：第 1 部分 - 经典控制理论](#)
- [测试电源 - 稳定性 \(第 3 部分\)](#)

之前在 [EDN.com](#) 上发布。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司