



Feng Qi

摘要

本应用报告包含 AM26x 系列器件在牵引逆变器的典型应用场景中的基准测试和分析。

内容

1 引言.....	2
2 AM26x FOC ISR 基准测试.....	3
3 牵引逆变器的典型应用场景.....	6
3.1 在周期 0 中对 ADC 采样，并在周期 1 中更新 PWM.....	7
3.2 在周期 0 的前半部分对 ADC 采样，并在周期 0 的后半部分更新 PWM.....	7
4 总结.....	8
5 参考文献.....	8

插图清单

图 1-1. 牵引逆变器框架中的资源.....	2
图 1-2. 牵引逆变器系统图.....	3
图 2-1. 带标准 C 库的 FOC 环路的 AM26x 软件计算与硬件接口.....	3
图 2-2. 带 TI R5F 库的 FOC 环路的 AM26x 软件计算与硬件接口.....	4
图 2-3. 带标准 C 库的 FOC 环路的 AM26x 时间消耗分解.....	4
图 2-4. 带 TI R5F 库的 FOC 环路的 AM26x 时间消耗分解.....	5
图 3-1. 在周期 0 中对 ADC 采样，并在周期 1 中更新 PWM.....	7
图 3-2. 在周期 0 的前半部分对 ADC 采样，并在周期 0 的后半部分更新 PWM.....	7

表格清单

表 2-1. AM26x FOC 环路基准测试.....	5
------------------------------	---

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

本应用手册介绍了从牵引逆变器框架 (*用于牵引逆变器的 AM263x*) 演示中总结的 AM2634 基准测试, 还讨论了基于基准测试的典型应用场景, 旨在帮助用户了解牵引逆变器中 AM2634 的性能。

图 1-1 和图 1-2 提供了系统资源和图表, 供下文讨论。AM2634 在 400MHz 内核频率和 200MHz 外设频率下运行, 该程序采用 TI Clang v1.3.0.LTS 和 O3 优化进行编译, 以获得理想的处理时间, 并将场定向控制中断服务例程 (FOC ISR) 分配给 ARM Cortex R5F 的 FIQ, 以实现低延迟。图 1-2 中 FOC ISR (ADC INT1 触发的 FOC 运行) 的性能是以下讨论的重点。

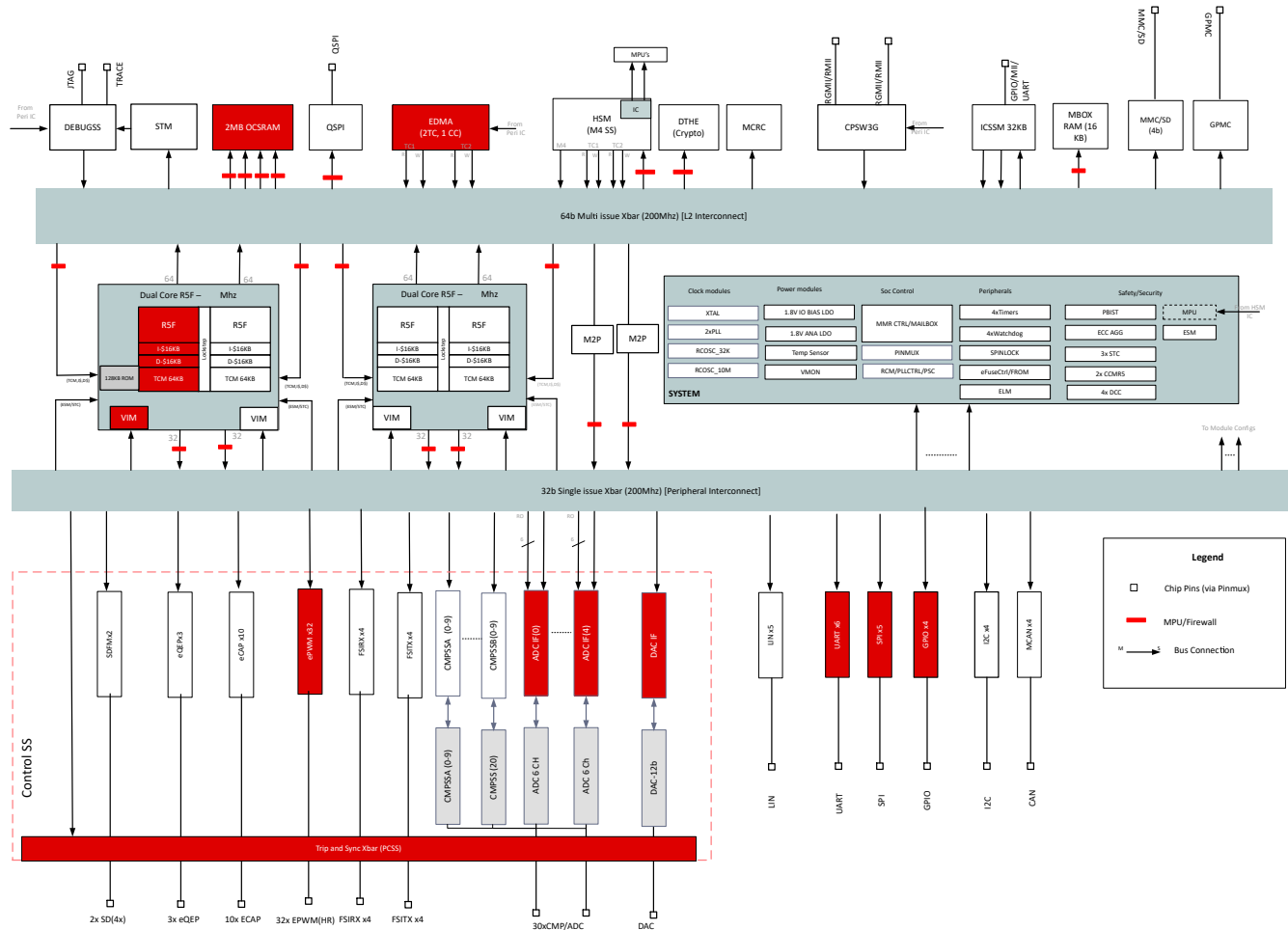


图 1-1. 牵引逆变器框架中的资源

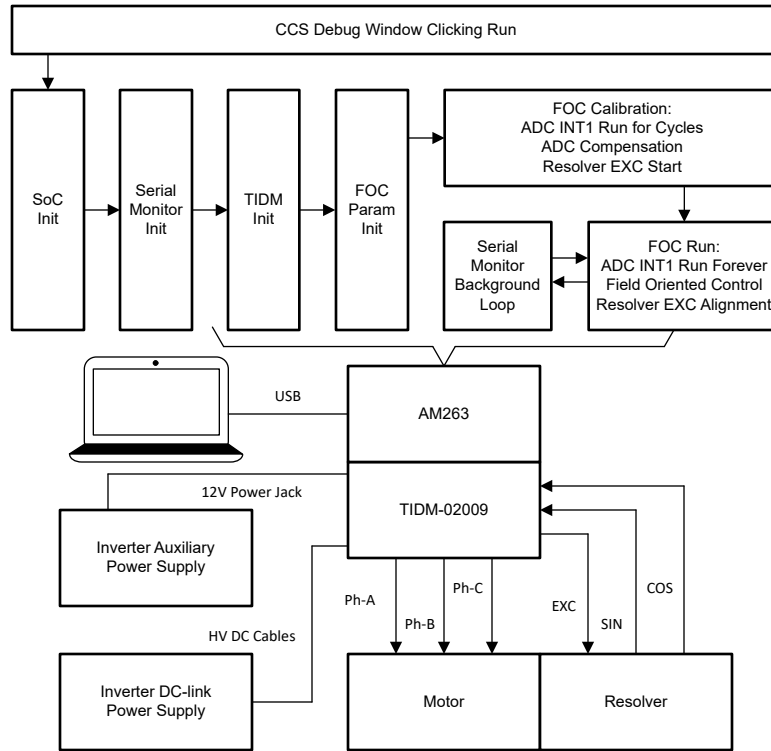


图 1-2. 牵引逆变器系统图

2 AM26x FOC ISR 基准测试

本节介绍 FOC ISR 中主要功能的基准测试。图 2-1、图 2-2、图 2-3 和图 2-4 中直观显示了这些内容。图 2-3 和图 2-4 中条形图的项目顺序（从上到下）与执行流程一致。图 2-3 和图 2-4 中的旭日图将执行时间按顺时针方向从长到短排列。表 2-1 总结了更多详细信息。从图 2-4 可以看出，使用 TI R5F math 库的 FOC ISR 从 PWM 时基计数零到更新的 PWM 占空比需要 3.9us。如图 2-2 所示，在这 3.9 μ s 中，硬件接口占了 40% 或 1.565 μ s，而计算占了 60% 或 2.335 μ s。在计算时间内，三角函数占 26% 或 600ns。除三角函数和硬件操作外的场定向控制小于 1 μ s，约占计算时间的 42%。没有三角函数的软件旋转变压器示例需要 150ns，为计算时间的 7%。其余 25% 的计算时间用于在演示逻辑中处理反馈和生成控制参考。ISR 末尾的日志函数不计入此基准测试，因为它是调试功能的一部分。

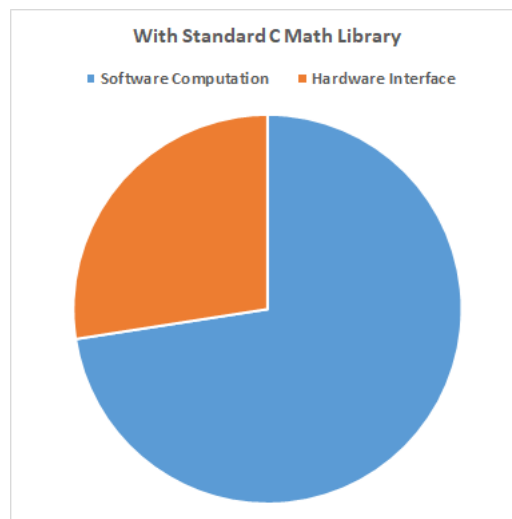


图 2-1. 带标准 C 库的 FOC 环路的 AM26x 软件计算与硬件接口

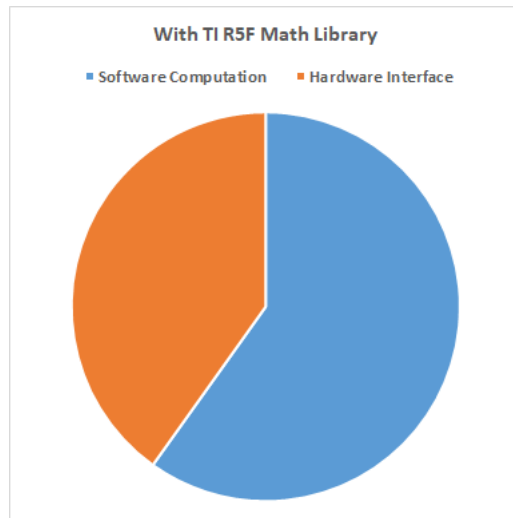


图 2-2. 带 TI R5F 库的 FOC 环路的 AM26x 软件计算与硬件接口

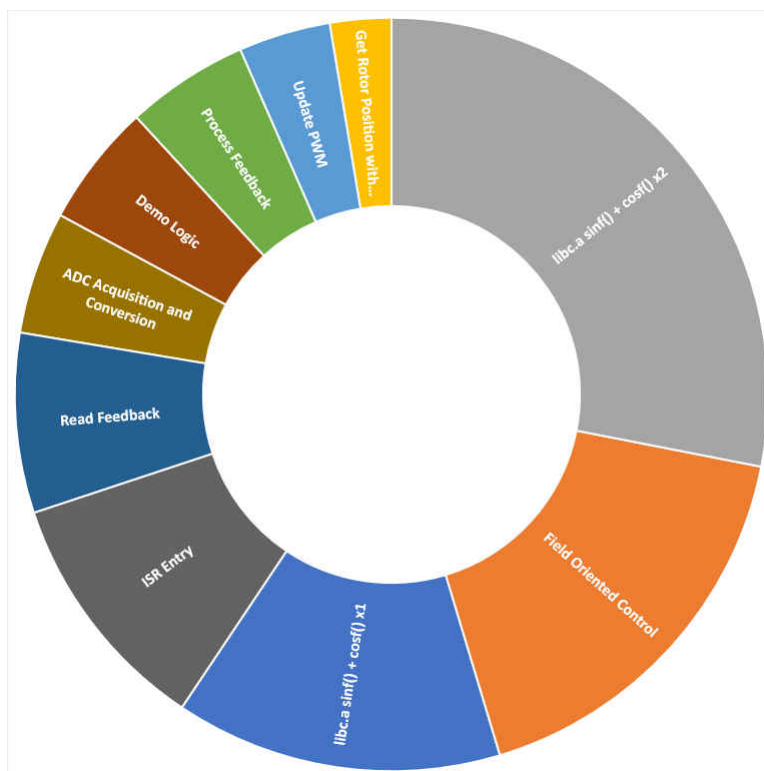
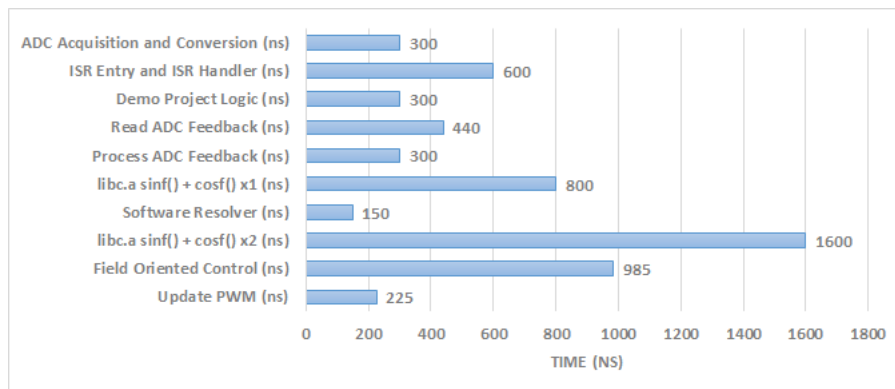


图 2-3. 带标准 C 库的 FOC 环路的 AM26x 时间消耗分解

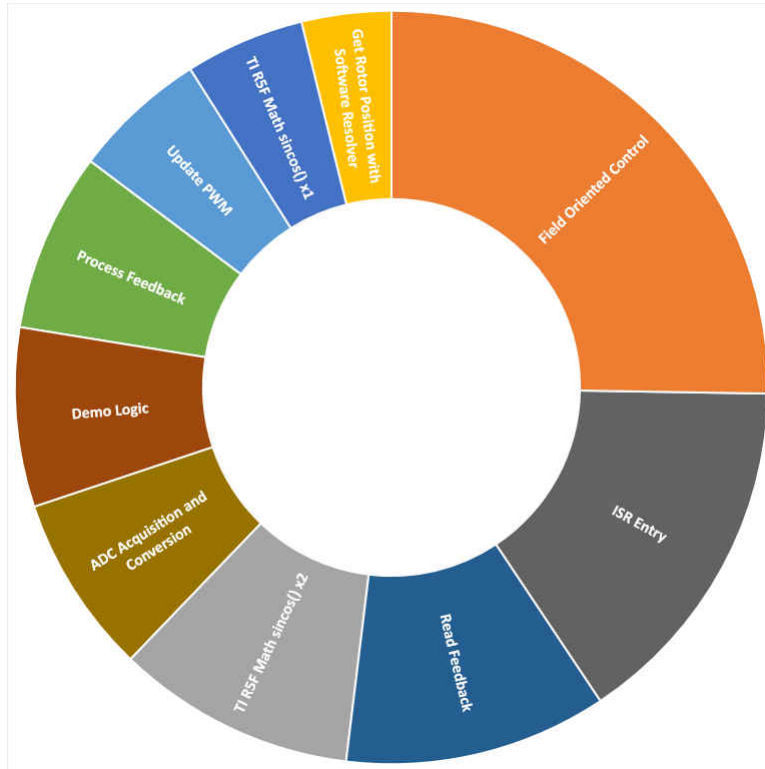
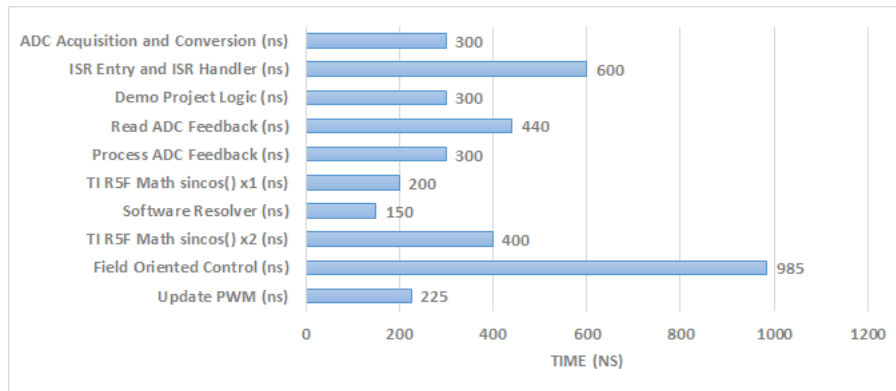


图 2-4. 带 TI R5F 库的 FOC 环路的时间消耗分解

表 2-1. AM26x FOC 环路基准测试

场定向控制中断服务例程	说明	运算类型	执行时间 (ns)
ADC 采集和转换	<ol style="list-style-type: none"> PWM 硬件触发器 ADC ADC 硬件采样、转换和触发中断 	硬件接口	300
进入 ISR	<ol style="list-style-type: none"> R5F 硬件进程中中断 中断处理程序加载 ISR 	硬件接口	600
读取反馈	<ol style="list-style-type: none"> 读取 8 个 ADC 结果，包括三相电流、旋转变压器正弦和余弦、直流链路电压和其他 	硬件接口	440
处理反馈	消除影响，调整量程，过滤噪声	计算	300
运行三角函数 - 选项 1，标准 C 库	从 lib.c.a 运行 3 次 $\sin()$ 和 $\cos()$ <ol style="list-style-type: none"> 针对软件旋转变压器运行一次 针对 Park 变换运行一次 针对 iPark 变换运行一次 	计算	2400

表 2-1. AM26x FOC 环路基准测试 (continued)

场定向控制中断服务例程	说明	运算类型	执行时间 (ns)
运行三角函数 - 选项 2, TI R5F Math	从 TI R5F Math 运行 3 次 ti_r5fmath_sincos() 1. 针对软件旋转变压器运行一次 2. 针对 Park 变换运行一次 3. 针对 iPark 变换运行一次	计算	600
使用软件旋转变压器获取转子位置	以 resolver_run() 为例, 在激励频率下获取旋转变压器反馈	计算	150
更新 PWM	写入 PWM 占空比	硬件接口	225
场定向控制	1. 速度环路控制器 2. 感应电机的滑差补偿 3. Park 和 Clark 变换 4. Id 控制器 5. Iq 控制器 6. 输出限制器 7. iPark 变换 8. 空间矢量生成 9. 占空比限制器	计算	985
演示逻辑	1. 用于开环和电流环测试的虚拟 0 发生器 2. 用于速度环路测试的测试曲线生成器	计算	300
总计	从 PWM 时基计数为零到 PWM 占空比更新	硬件接口和计算	3900

3 牵引逆变器的典型应用场景

设计牵引逆变器的方法有很多, 但大多数都采用类似的 ADC 采样和 PWM 更新方案。本节提供了两个典型的牵引逆变器设计示例, 它们在向上/向下计数或中心线定时 PWM 中运行。下面列出了这两种情况。除非以下章节中指定了新频率, 否则将在 PWM 和旋转变压器正弦激励频率均为 10kHz 的情况下分析这些情况。

- 在周期 0 中对 ADC 采样, 并在周期 1 中更新 PWM
- 在周期 0 的前半部分对 ADC 采样, 并在周期 0 的后半部分更新 PWM

3.1 在周期 0 中对 ADC 采样，并在周期 1 中更新 PWM

如表 2-1 所示，FOC ISR 从 PWM 计数零到更新的 PWM 占比需要 $3.9 \mu\text{s}$ 。在 10kHz 下 $100\mu\text{s}$ 的期间内，ISR 仅占集群 0 核心 0 处 R5F 的 3.9%，这比 AM263x 上所有 CPU 的 1% 时间还少。AM263x 还有 99% 的计算能力可以支持其他应用。但是，强烈建议将控制环路保持在一个核心内，因为处理器间通信非常耗时，尤其是在不同集群之间。

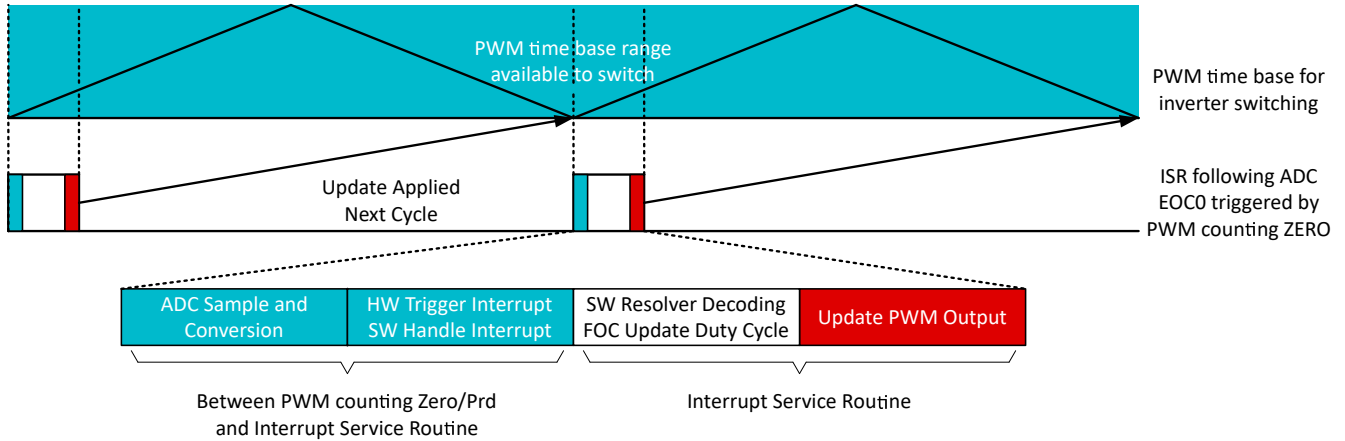


图 3-1. 在周期 0 中对 ADC 采样，并在周期 1 中更新 PWM

3.2 在周期 0 的前半部分对 ADC 采样，并在周期 0 的后半部分更新 PWM

在这种情况下，可以使用 10kHz PWM 在 20kHz 时收集反馈。对于 10kHz 旋转变压器，可以对峰值和谷值进行采样，并在处理后使用。 $3.9\mu\text{s}$ 的执行时间约为半 PWM 周期 (即 $50\mu\text{s}$) 的 7.8%。与图 3-1 类似，如果优先将 FOC ISR 上的时间保持为低于单核使用量的 60%，则单核仍剩有 50% 以上的时间用于定制操作。

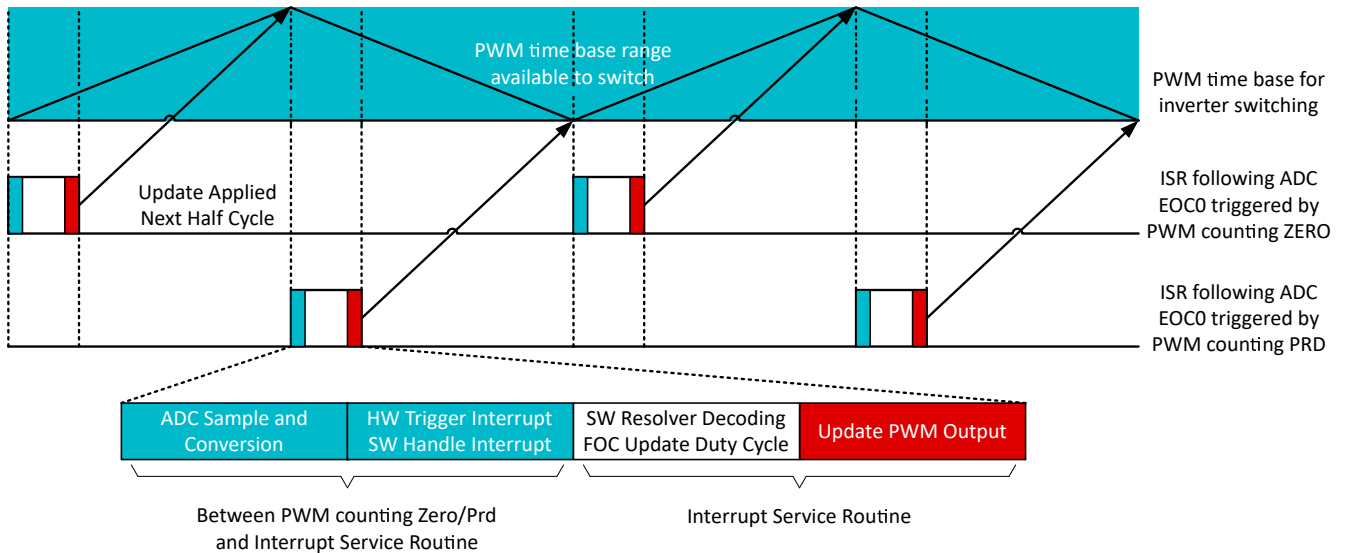


图 3-2. 在周期 0 的前半部分对 ADC 采样，并在周期 0 的后半部分更新 PWM

另一方面，在另一种情况下，即 20kHz PWM 和 20kHz 旋转变压器，中断服务程序将在 40kHz 下运行。 $3.9\mu\text{s}$ 约为半 PWM 周期 (即 $25\mu\text{s}$) 的 16%。如果 ISR 受到单核使用量的 60% 所限，则还有 40% 以上的时间。如果有 40kHz 的旋转变压器和 40kHz PWM，则这些数字可以简单地在基本控制环路上调节到 32%，而 28% 用于定制操作。如果是 20kHz 旋转变压器和 40kHz PWM，则应通过将旋转变压器和速度环路分配到两个电流环路周期中，略微降低基本控制环路上的百分比。

4 总结

如前几节所述，AM263x 牵引逆变器演示使用 TI Clang v1.3.0.LTS 中的 O3 进行了优化。从 ADC 采样开始到 PWM 更新结束，400MHz R5F 内核运行需要 3.9 μ s，该内核还剩下相当多的时间用于定制操作。而且，同一集群中还有一个 R5F 用于双模配置，另一个 R5F 内核集群用于双模或锁步模式。如果所有内核都采用双模，则在 100 μ s PWM 周期中有 400 μ s CPU 时间可用。3.9 μ s 事件小于 400 μ s 总 CPU 时间的 1%。

鉴于牵引逆变器的性质，另一个集群可能会针对 AutoSAR 配置为锁步模式，而该集群中的其他 R5F 可以用作安全监测器。由此，在 20kHz PWM、20kHz 旋转变压器以及在一个 PWM 周期内更新两次的情况下，3.9 μ s 仅占牵引内核使用量的 15.6%；如果在一个内核中为控制环路中断服务例程设置了 60% 限制，则可用 CPU 时间为 44%。

毕竟，AM263x 系列器件是适用于牵引逆变器的强大平台。

5 参考文献

- 德州仪器 (TI)：[用于牵引逆变器的 AM263x](#)

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司