



Aki Li and Nima Eskandari

## 摘要

C2000™ 器件中的增强型脉宽调制器 (ePWM) 外设是数字控制系统的核心，该外设高度可编程、极其灵活且易于使用，能够生成复杂的脉宽波形，同时最大限度地减少 CPU 开销。经过多年的演变，新一代 C2000 器件增加或优化了越来越多的特性，尤其是 ePWM 外设。本应用报告讨论了一些有助于多相拓扑的新功能，包括同步期间的加载、同步写入、全局加载和一次性重新加载。

## 内容

1 简介.....	2
2 利用新特性进行多相控制.....	2
2.1 同步期间的影子到活动加载.....	3
2.2 在模块间同时写入寄存器.....	5
2.3 全局加载和一次性加载模式.....	7
3 参考文献.....	11

## 商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

在数字电源或工业驱动应用中，随着对功率水平要求的不断提高，多相拓扑更受欢迎。即使功率水平相同，与单功率级相比，并联使用多个转换器通常可带来以下好处：

- 通过平均不同模块上的总电流，提高效率并降低导通损耗
- 通过交错控制降低电压/电流纹波

但是，考虑到如何在不同 ePWM 模块之间管理时基同步和保持正确的相位关系时，多相位应用的控制会更加复杂。基于 20 年的实时控制专业知识，C2000 微控制器开发人员在 ePWM 外设中开发了许多专用功能以处理针对多相应用的正确控制。本报告将讨论如何更好地使用第 3 代器件 ( F2838x、F2837x、F2807x、F28004x、F28002x ) 中的新特性，包括同步期间的加载、同步写入、全局加载和一次性重新加载。有关具有同一类型 ePWM 模块的所有器件的列表 ( 用以确定各类型之间的差异 )，以及同一类型内特定于器件的差异列表，请参阅《C2000 实时控制 MCU 外设参考指南》。

## 2 利用新特性进行多相控制

对于典型的多相电源转换器，需要仔细考虑以下两个因素。

- 适当的相位控制

每个 ePWM 模块都可以配置为允许 SyncIn 脉冲将相位寄存器 (TBPHS) 内容加载到时基计数器 (TBCTR) 中。因此，通过将适当的值编程到 TBPHS 中，多个 PWM 模块可以处理一些依赖于支路 ( 或级 ) 之间的相位关系实现正确运行的电源拓扑，例如交错 PFC、交错 LLC 等。基本上，通过设置 TBPHS 值，N 相的相位关系可以用方程式 1 中所示的以下公式得出。

$$TBPHS(N,M) = (TBPRD/N) \times (M-1) \quad (1)$$

其中，N = 相位数，M = PWM 模块数。

例如，对于三相情况 (N=3)，TBPRD = 600；TBPHS(3,2) = (600/3) × (2-1) = 200 ( 即，同步接收模块 2 的相位值 )；TBPHS(3,3) = 400 ( 即，同步接收器模块 3 的相位值 )。

图 2-1 显示了这种 120° 相位关系的相关时序波形，并且两个同步接收器模块都与同步源模块同步。

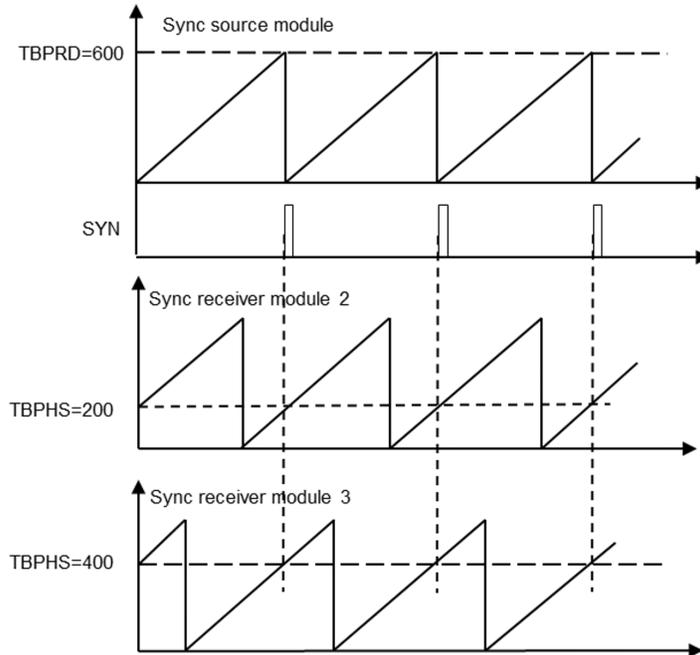


图 2-1. 与三个模块之间的相位控制相关的时序波形

- 跨多个 ePWM 模块正确更新寄存器

在实际应用中，ePWM 输出通常会根据控制环路的要求而变化，例如可变占空比、频率等。必须在更改后确保不同 ePWM 模块之间的相位关系和同步性相同。通常，为了避免寄存器被软件异步修改而导致损坏或虚假操作，会启用影子寄存器。影子寄存器为活动寄存器提供缓冲保护或提供临时保存位置。用户负责在影子寄存器的内容被传送到活动寄存器（用于控制硬件操作）时选择事件。

## 2.1 同步期间的影子到活动加载

在上一代 C2000 器件中，对于 0 型或 1 型 ePWM，当时基计数器为零 (TBCTR = 0x0000) 时，影子寄存器的内容被传输到活动寄存器 (TBPRD (活动) ← TBPRD (影子))。在变频应用期间，它可能会导致相位不匹配问题。

图 2-2 显示了一个具有两相交错控制的示例，在 ePWM1 和 ePWM2 模块之间使用 120° 相移。ePWM1\_ZERO 事件被选为 ePWM2 的 SyncIn 脉冲。假设 ISR 更改频率发生在 ePWM1\_ZERO 事件和 ePWM2\_ZERO 事件之间，并且 TBPRD ePWM1 和 ePWM2 的影子寄存器更新为新的周期值 (1200)，ePWM2 的 TBPHS 立即更新为 400。如波形所示，活动 TBPRD 值直到下一个 ePWM2\_ZERO 事件才能更新，因此频率变化后的相移关系不正确。更糟糕的情况是，如果 ePWM2 的新 TBPHS 值大于之前的周期寄存器值，则当 TBCTR 在 SyncIn 事件中加载此值时，可能会导致不可预测的结果。因此，时基计数器不断向上计数超过周期寄存器值，直到它最终回滚。

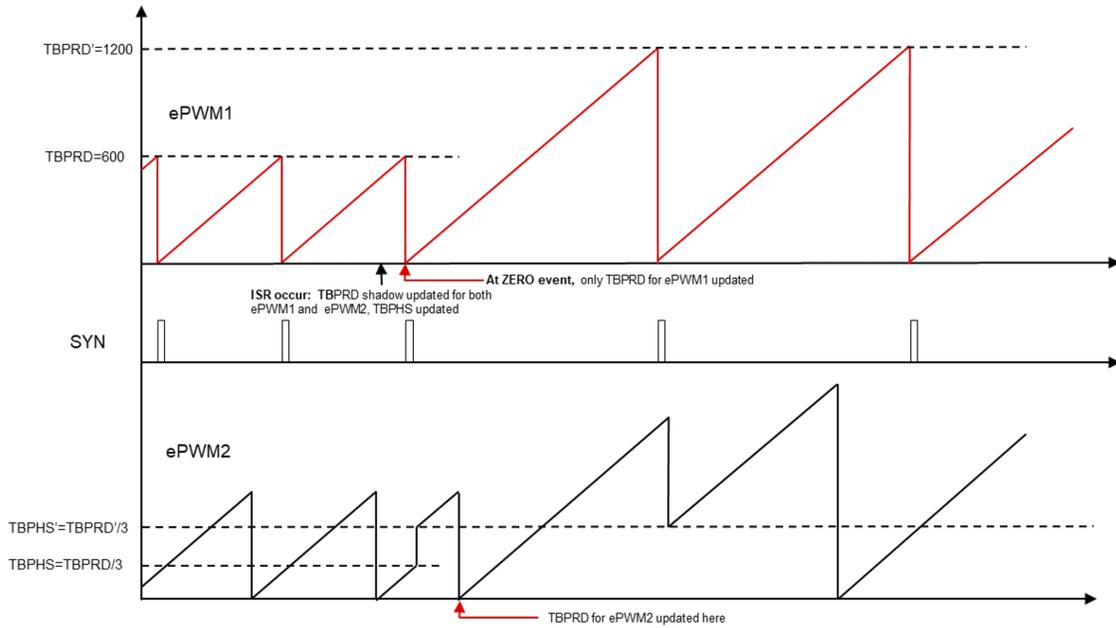


图 2-2. 上一代 C2000 器件的相位控制限制

上述风险已在 2 型 ePWM 中得到解决，后者会额外启用同步事件，由 TBCTL2[PRDLDSYNC] 位确定，以使影子到活动加载对 TBPRD 和 CMP 寄存器有效。这样就可以得到正确的相移，如图 2-3 所示。

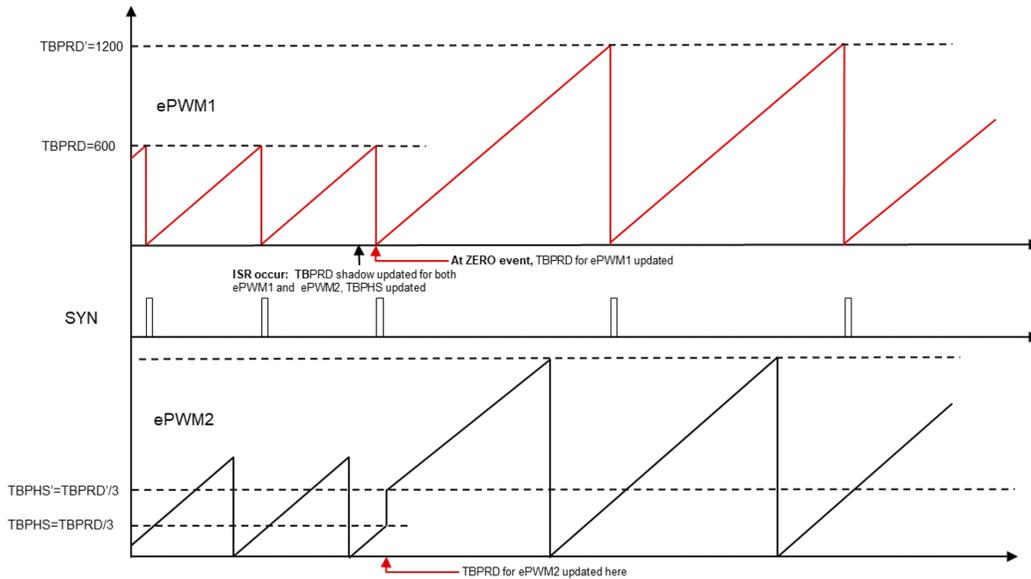


图 2-3. 借助同步期间的影子到活动加载实现正确的相移控制

## 2.2 在模块间同时写入寄存器

在 LLC 等变频应用中，控制 ISR 将会更新周期和比较寄存器，该操作以固定频率运行，此频率与 PWM 开关频率异步。因此，可能会在切换周期即将结束的某一时间点触发执行 ISR。如果是这种情况，用于更新 ePWM 寄存器的 ISR 代码的某些部分有可能在周期结束之前执行，而该代码的其余部分在下一个开关周期中执行。如图 2-4 所示，ePWM1 的周期寄存器在开关周期结束前更新，而 ePWM2 的周期寄存器并未及时更新。因此，ePWM2 以旧的 PWM 频率运行，而 ePWM1 以新频率运行，这对功率级来说会是灾难性的。

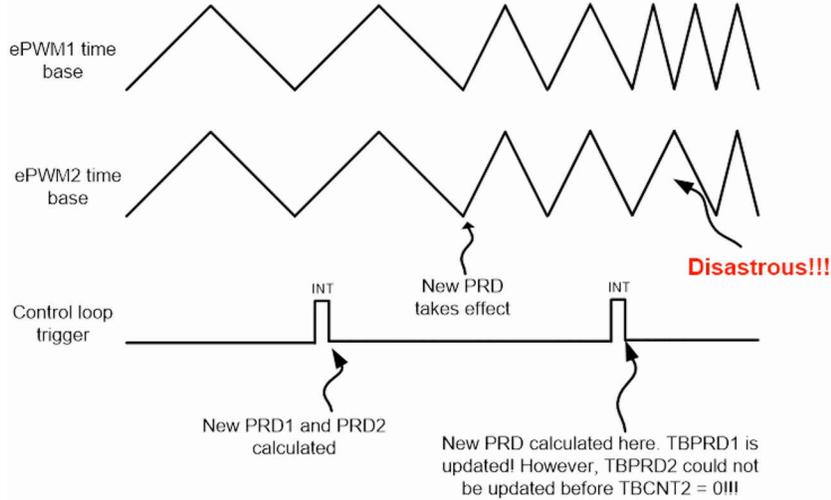


图 2-4. ISR 发生在开关周期边界上时的潜在问题

A. 这是一个变频应用，因此使用了影子化周期加载。

为了尽快更新不同 ePWM 模块的影子寄存器，新型 ePWM 提供了寄存器链接方案，链接寄存器为 EPWMXLINK。这可以防止 SyncIn 脉冲在所有寄存器在 ePWM 模块间更新之前强制影子到活动加载这些寄存器的情况。TBPRD:TBPRDHR、CMPA:CMPAHR、CMPB:CMPBHR、CMPC 和 CMPD 寄存器可通过 EPWMXLINK 启用。将向相应的寄存器同时写入值，此值与写入所链接的 ePWM 模块的寄存器的值相同。

通过同时写入特性，可以确保不同 ePWM 模块间的同一寄存器始终都同时更新。但是，同一 ePWM 模块内的不同影子寄存器仍然需要在软件中手动逐一更新，因此可能会发生并非所有 ePWM 寄存器都在影子到活动加载事件之前更新的情况。可能会出现一种灾难性的结果，如图 2-5 所示。

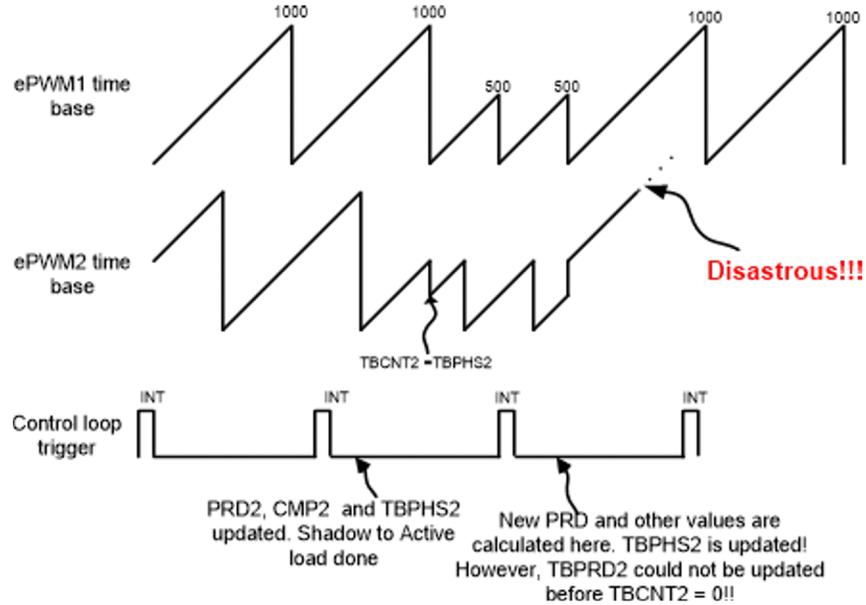


图 2-5. 不同寄存器未同时更新时的灾难性结果

### 2.3 全局加载和一次性加载模式

本节介绍的全局加载和一次性加载模式，有助于进一步实现对多个 ePWM 模块的优化控制，尤其是在变频应用中。传统影子模式被定义为单独配置的局部加载模式，而全局加载模式适用于所有通过  $GLDCFG[REGx]=1$  启用的影子寄存器。当此功能启用 ( $GLDCTL[GLD] = '1'$ ) 后，从影子寄存器到活动寄存器的内容传输发生在由全局影子到活动加载控制寄存器 ( $GLDCTL[GLDMODE]$ ) 中的配置位定义的同—事件中。图 2-6 所示为框图。

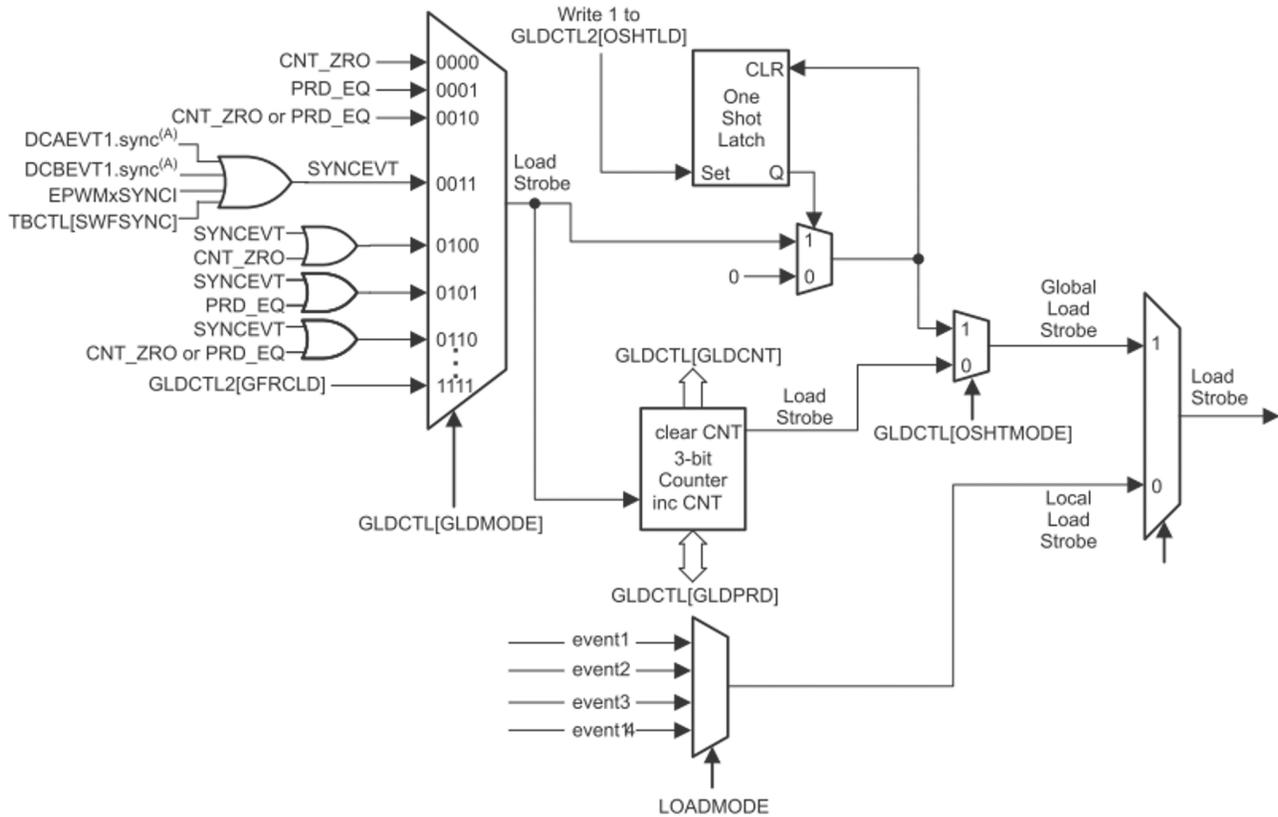


图 2-6. 全局加载和一次性加载方框图

如果控制 ISR 与 PWM 开关频率异步，则还需要使用一次性加载模式和全局加载模式，以确保多个 PWM 模块中的所有寄存器在所选事件中都是最新的。

使用一次性加载模式，用户可在全局加载机制下设置  $GLDCTL2[OSHTLD] = '1'$ ，以确保影子寄存器到活动寄存器的传输只发生一次。换言之，所有全局加载事件都被阻止，除非  $GLDCTL2[OSHTLD] = '1'$ 。此外，也可以跨多个 PWM 模块使用  $EPWMXLINK[GLDCTL2LINK]$  链接  $GLDCTL2$  寄存器。因此，借助 ePWM 链接方案，当在所有寄存器更新后启用一次性加载模式时，一个或多个 PWM 模块中的多个 PWM 寄存器只会在第一次全局加载事件中生效，后续事件将被忽略。

### 2.3.1 应用示例

TIDA-00961 中的一个配置示例展示了如何使用全局负载和一次性模式，该示例位于安装 **C2000Ware 数字电源 SDK** 后的以下目录中：

C:\ti\c2000\C2000Ware\_DigitalPower\_SDK\_<version\_number>\solutions\tida\_00961

**TIDA-00961**：基于 **GaN** 的高效率 **1.6kW** 高密度 **1MHz CrM** 图腾柱 **PFC** 转换器参考设计是一种两相交错式图腾柱 **PFC** 参考设计，以高达 **1MHz** 的可变工作频率运行，具有临界导电模式 (**CrM**)，同时，控制 **ISR** 以 **50kHz** 的频率运行。以下步骤显示了有关如何使用全局加载和一次性加载模式的关键配置，以及 **TIDA-00961** 中的示例代码。

1. 在全局加载配置寄存器 (**GLDCFG[REGx]**) 中选择相关寄存器，以启用同步源和同步接收器 **ePWM** 模块的全局加载模式。
2. 在全局影子到活动加载控制寄存器 (**GLDCTL[GLDMODE]**) 中定义全局加载事件。
3. 向 **GLDCTL[OSHTMODE]** 写入 **1**，启用一次性加载模式。
4. 向 **GLDCTL[GLD]** 写入 **1**，启用全局影子到活动寄存器加载模式。
5. 使用链接方案 **EPWMXLINK** 将同步接收器 **ePWM** 模块的 **GLDCTL2** 寄存器链接到寄存器 **EPWMXLINK[GLDCTL2LINK]** 中的同步源 **ePWM** 模块。
6. 在执行 **ISR** 期间，手动更新相关寄存器后，通过向 **GLDCTL2[OSHTLD]** 写入 **1** 来打开同步源 **ePWM** 模块的一次性锁存条件。通过这种方式，同步接收器 **ePWM** 模块也将在链接方案下以一次性模式启用。

以下代码显示了 **TIDA-00961** 中同步源 **ePWM1** 和同步接收器 **ePWM2** 的部分配置。

- 在初始化期间

```
// Sync source ePWM1 settings
EPWM_enableGlobalLoadRegisters(base1, EPWM_GL_REGISTER_CMPA_CMPAHR|
    EPWM_GL_REGISTER_TBPRD_TBPRDHR|EPWM_GL_REGISTER_DBRED_DBREDHR|
    EPWM_GL_REGISTER_DBFED_DBFEDHR|EPWM_GL_REGISTER_CMPC);
EPWM_setGlobalLoadTrigger(base1, EPWM_GL_LOAD_PULSE_CNTR_PERIOD);
EPWM_enableGlobalLoadOneShotMode(base1);
EPWM_enableGlobalLoad(base1);

// Sync receiver ePWM2 settings

EPWM_enableGlobalLoadRegisters(base2, EPWM_GL_REGISTER_CMPA_CMPAHR|
    EPWM_GL_REGISTER_TBPRD_TBPRDHR|EPWM_GL_REGISTER_DBRED_DBREDHR|
    EPWM_GL_REGISTER_DBFED_DBFEDHR);
EPWM_setGlobalLoadTrigger(base2, EPWM_GL_LOAD_PULSE_SYNC);
EPWM_enableGlobalLoadOneShotMode(base2);
EPWM_enableGlobalLoad(base2);

EPWM_setupEPWMLinks(base2, EPWM_LINK_WITH_EPWM_2, EPWM_LINK_GLDCTL2);
```

- 在执行控制 **ISR** 期间

```
EPWM_setGlobalLoadOneShotLatch(HIGH_FREQ_PWM1_BASE);
```

### 2.3.2 临界情况

考虑到所有可能的工作条件，我们将讨论以下临界情况，如图 2-7 所示。ePWM2 配置为支持到 ePWM1 的相移为  $120^\circ$ ，其中 TBPHS 为  $PRD/3=200$ 。ePWM2 输出在  $CTR = 0$  时设置为高电平，并在  $CTR = CMPA$  时清除低电平，开始时  $CMPA=300$ 。ePWM1 和 ePWM2 的所有寄存器都在全局加载和一次性触发模式下启用，ePWM1 的全局加载事件定义为  $CTR = 0$ 。假设在执行 ISR 期间发生频率突变事件，在全局加载事件之前，新周期值  $PRD'$  变为  $2*PRD=1200$ ， $TBPHS' = PRD' / 3=400$ ，而  $CMPA$  保持不变。然后，如图 2-7 所示，当下一个全局加载事件到来时，ePWM2 的时基计数器将从 200 跳到 400，这意味着在频率变更之后的第一个 PWM 周期内将错过  $CTR = CMPA$  事件。这可能会给系统带来严重的风险，ePWM2 输出时间会意外延长。

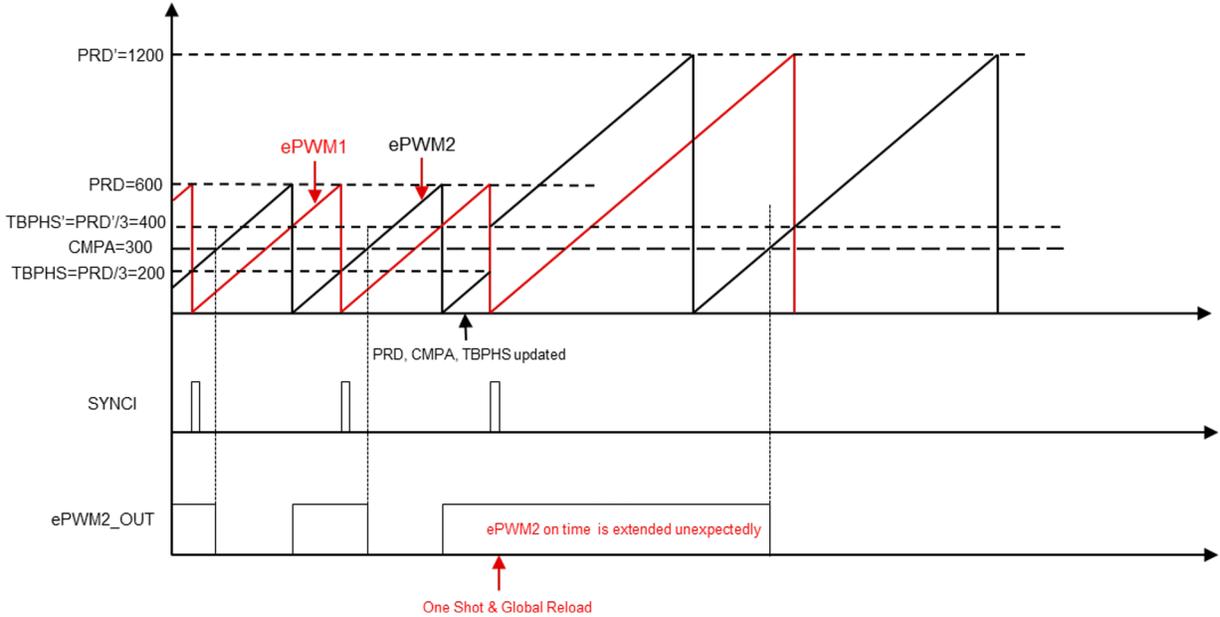


图 2-7. 变频应用中的临界情况

### 2.3.2.1 权变措施选项 1

为了避免上述结果，可以选择以下权变措施，如图 2-8 所示。ePWM1 的全局加载事件定义为 CTR = 0，而 ePWM2 的全局加载事件定义为同步事件或 CTR = 0。在 ISR 更新 ePWM 寄存器期间，建议监视新的 CMPA 和 TBPHS 值与其之前的值。如果新的 TBPHS 寄存器值和计数器比较寄存器值会使 PWM 计数器跳过 CMPA 值，可以临时更改计数器比较寄存器值，然后在执行下一个 ISR 期间更改回所需的值。

这里仍使用上文的例子，当新的相位寄存器 TBPHS' 更新为 400 时，CMPA 需要改为  $CMPA' = TBPHS' + 1 = 401$ 。然后，启用一次性加载模式，因此当下一个全局事件发生时，仍然可以保持预期的相移，同时 ePWM2 的占空比也被钳制在控制范围内。之后，在执行下一个 ISR 期间，需要将 CMPA 值改回预期值，并再次启用一次性加载模式，以便在接下来的开关周期中校正占空比。

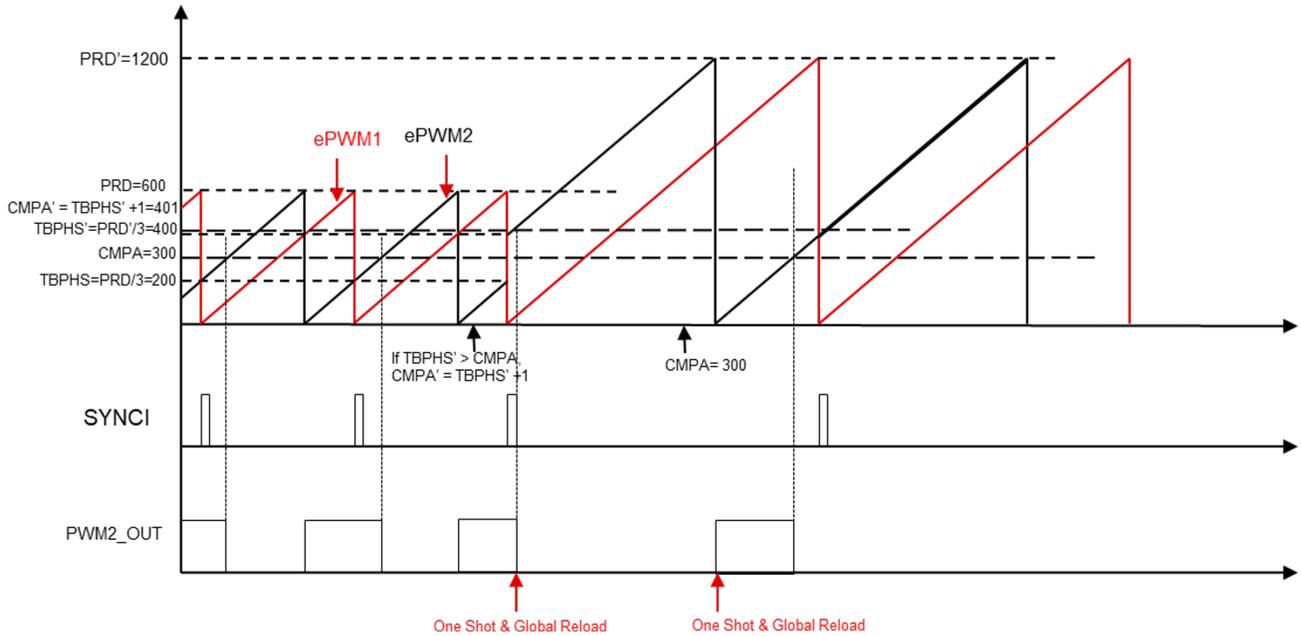


图 2-8. 针对临界情况的权变措施

### 2.3.2.2 权变措施选项 2

上述权变措施选项需要额外的软件带宽来处理此类临界情况，而采用可配置逻辑块 (CLB) 的另一个选项则基于硬件且更加简单。基本思路是使用 CLB 来监控特定 ePWM 输出的导通时间，并在发生上述临界情况时将其钳位在预期的占空比内。

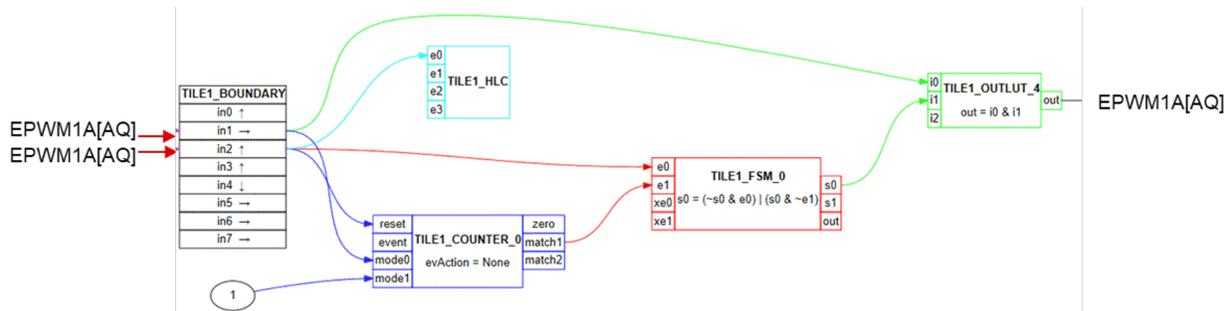


图 2-9. CLB 选项方框图

如图 2-10 所示，以 ePWM1A 为例，ePWM1 的 AQ 子模块的输出用于 CLB 输入信号，COUNTER0 用于对 ePWM1A 的导通时间进行计数。FSM0 将提供钳位信号，其中 FSM0 e0 指的是 EPWM1A[AQ] 的上升沿，FSM0 e1 指的是 COUNTER0 match1 事件。因此，实际的 EPWM1A[AQ] 信号是与 FSM0 s0 进行与逻辑。

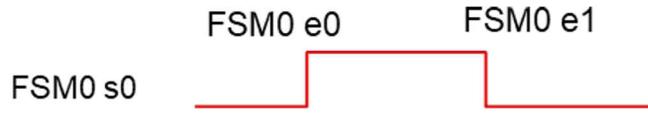


图 2-10. FSM 操作

基于这种方案，每次更新多个 ePWM 寄存器时，COUNTER0 的 match1\_val 寄存器也会使用钳位占空比（即节 2.3.2.1 中的 CMPA 值）进行更新。这样，可以始终确保 ePWM 输出处于安全状态。上述配置已经通过 F280049 控制卡验证，如图 2-11 所示，其中 ePWM1A 的占空比初始设置为 50%，最后被 CLB 钳位到 30%。



图 2-11. 经过验证的示例波形

### 3 参考文献

- 德州仪器 (TI)：《C2000 实时控制 MCU 外设参考指南》
- 德州仪器 (TI)：《TMS320F28004x 实时微控制器技术参考手册》
- 德州仪器 (TI)：《TMS320F28004x 微控制器数据手册》
- 德州仪器 (TI)：基于 GaN 的高效率 1.6kW 高密度 1MHz 图腾柱 PFC 转换器参考设计

## 重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

## 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