

Application Note
处理谐振转换器中的 PWM 挑战



Brian Wang

摘要

如今，需要 PWM 相移和频率变化的拓扑已广泛用于数字电源应用。由于要求更高的效率和更高的功率级别，因此引入了多相交错式 LLC 等复杂拓扑。为了应对这一挑战，TI 的第 3 代 C2000 器件中引入了 4 类 PWM。特别是，全局加载和一次性重新加载等新功能会显著简化实现相移和频率变化拓扑。本应用手册讨论了这些新功能的优势，以及如何在实践中处理临界情况。

内容

1 引言.....2

2 在 MCU 中实现 LLC 控制面临的挑战.....3

 2.1 频率变化需要更新多个 PWM 配置.....3

 2.2 控制频率和开关频率之间无固定时序关系.....3

3 临界情况和实际挑战.....5

 3.1 软件权变措施.....5

 3.2 基于 CLB 的硬件权变措施.....6

4 总结.....7

5 参考资料.....7

插图清单

图 1-1. 增益与频率关系图.....2

图 2-1. 与影子到活动加载重叠的 PWM 更新.....3

图 2-2. 4 类 ePWM 全局加载方框图.....4

图 2-3. 一次性加载功能.....4

图 3-1. LLC 转换器中的 PWM 障碍.....5

图 3-2. 软件权变措施.....6

图 3-3. CLB 权变措施方框图.....6

图 3-4. CLB 逻辑块配置.....7

图 3-5. CLB 权变措施测试结果.....7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

随着服务器和电信 PSU 等电源应用对额定功率和效率的要求越来越高，LLC 等谐振转换器已成为越来越多新设计中直流/直流级的优先选择。与传统的全桥拓扑相比，LLC 由于谐振操作而更容易实现软开关，从而带来更好的 EMI 性能、更高的效率和更小的功率级应力。

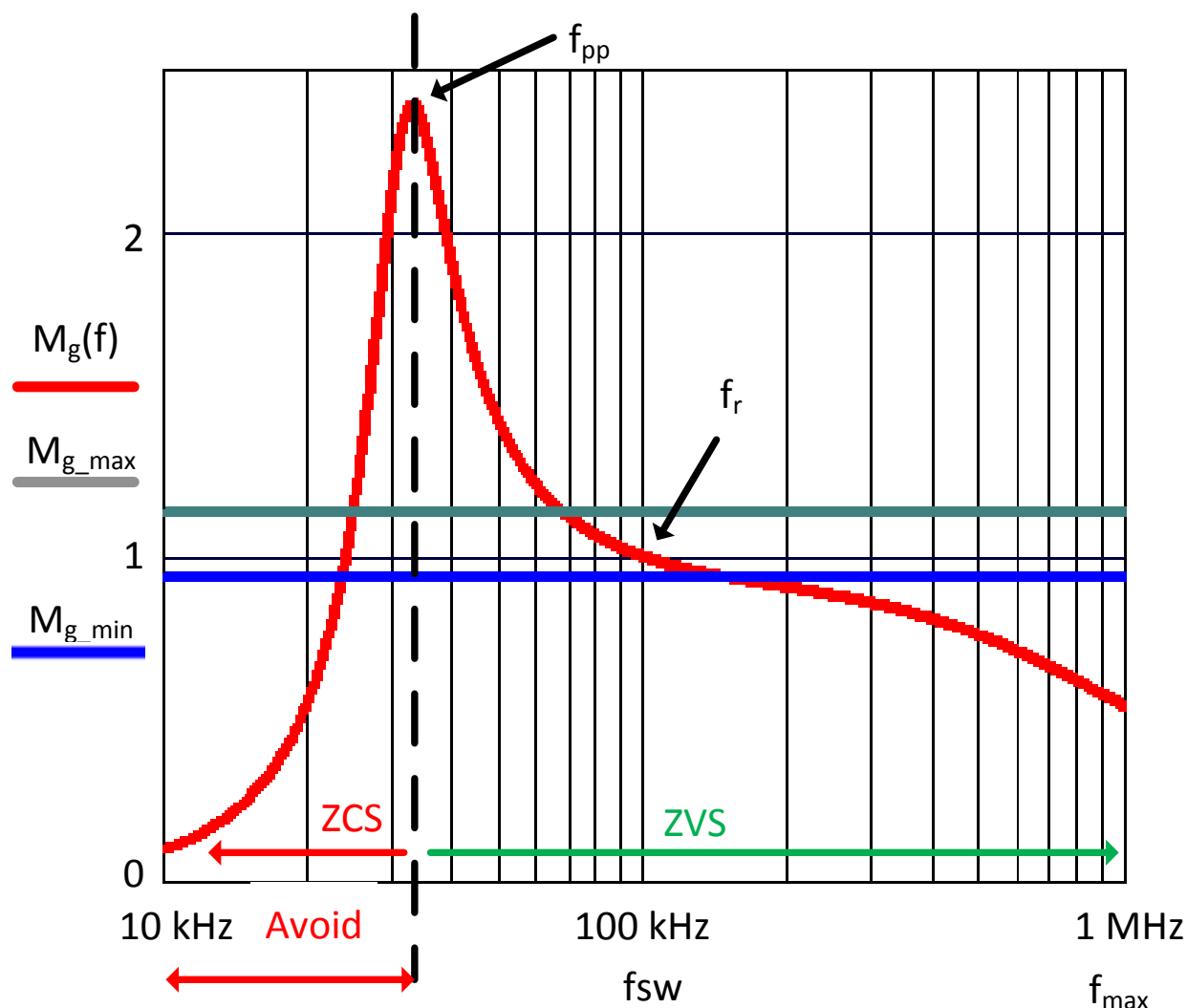


图 1-1. 增益与频率关系图

LLC 转换器通常在频率可变但占空比固定的条件下工作。LLC 转换器的典型增益曲线如下图所示。该转换器在 f_r 附近工作，并通过控制环路调节开关频率以稳定输出电压。

2 在 MCU 中实现 LLC 控制面临的挑战

与通常在固定开关和 ISR 频率下工作的传统电源拓扑进行比较。由于以下两个方面的原因，LLC 拓扑变得更复杂，需要由 MCU 控制。

2.1 频率变化需要更新多个 PWM 配置

在 LLC 转换器中，开关频率变化将需要相应地更新多个 PWM 寄存器，包括多相交错拓扑中的 TBPRD、CMPx 或 TBPHS。因此，需要有一种机制来缩短更新寄存器所需的 CPU 周期，并同步影子到加载多个寄存器中的活动寄存器。

在 4 类 ePWM 中，如果相应的 GLDCFG[REGx] 设置为 1，则可以对所有影子寄存器使用新的全局加载功能，并且一旦 GLDMODE 寄存器配置的事件发生，从影子寄存器到活动寄存器的所有加载都会同时发生。图 2-1 中展示了可用的全局加载事件源。

此外，在 LLC 转换器中，多个电源开关在转换器中共享相同的开关频率和占空比。可以通过配置 EPWMXLINK 寄存器中的相应位来启用 PWMLINK。例如，如果 EPWM2LINK[CMPLINK] 设置为 0x0000(EPWM1)，则所有对 EPWM1 CMPA 寄存器的写入都会同时导致对 EPWM2 CMPA 的写入。

通过执行上述所有程序，您可以尽可能地缩短 PWM 升级时间，并在 PWM 升级完成之前禁止意外的影子到活动加载。

总体来说，4 类 ePWM 的新功能将显著简化 LLC 转换的控制，并有助于降低意外 PWM 行为引起的潜在风险。

2.2 控制频率和开关频率之间无固定时序关系

在 MCU 中实现 LLC 控制的典型方法是实现固定频率的控制环路，以便对中断和后台循环都进行良好的组织和正确的响应。然而，由于 LLC 开关频率逐周期变化，开关和控制 ISR 之间的时序关系变得不可预测。

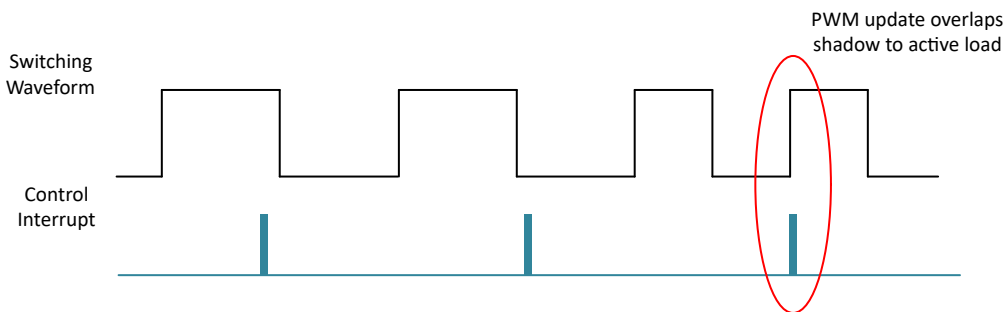


图 2-1. 与影子到活动加载重叠的 PWM 更新

传统上，只要配置的事件发生，影子寄存器就会加载为活动状态。在 4 类 PWM 中，可以是 CTR=PRD、CTR-0 等情况。因此，在 LLC 转换器中，务必要确保在 PWM 开关周期开始或结束时仔细更新 PWM 配置，以确保它不会造成任何 PWM 障碍。理想情况下，当发生 PWM 配置更新时，应当禁止影子到活动加载，因此不会发生占空比、周期和相移不匹配。

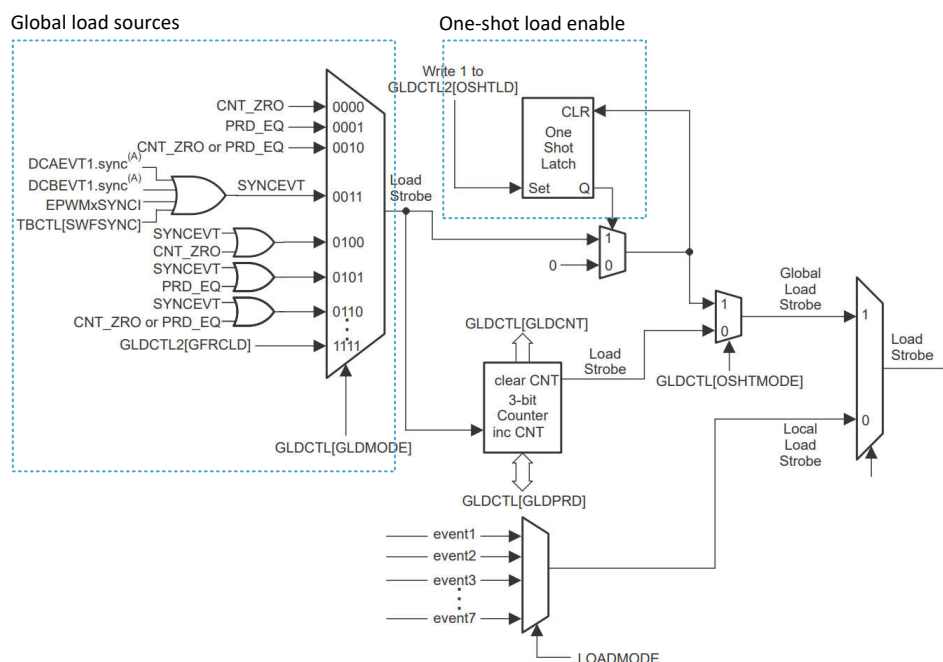


图 2-2. 4 类 ePWM 全局加载方框图

为了解决此问题，在 C2000 4 类 ePWM 中引入了一次性加载。理想的情况是向影子到活动加载事件添加额外的“屏蔽”。仅当 GLDCTL2[OSHTLD] 设置为 1 时，加载事件才会触发影子到活动加载，并且在加载发生后该位将自动清除，以便为下一次更新做好准备。

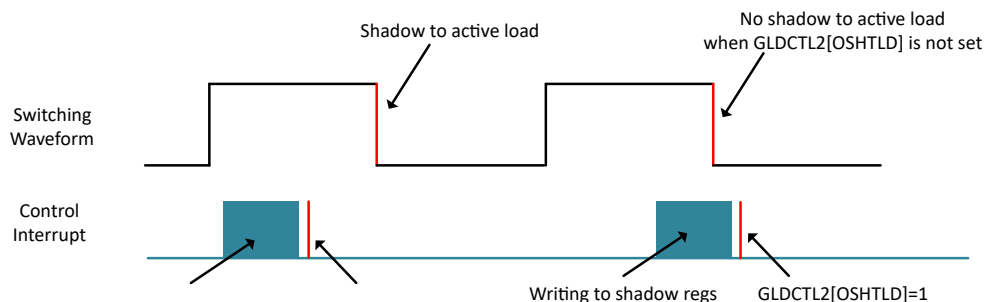


图 2-3. 一次性加载功能

3 临界情况和实际挑战

但是在实际情况中，即使启用了全局加载和一次性加载，也偶尔会观察到一些意外的 PWM 行为。即使这些行为由罕见的临界情况引起，并且它们的发生概率也很低，但仍可能造成严重损坏，尤其是在重要的电源应用中。

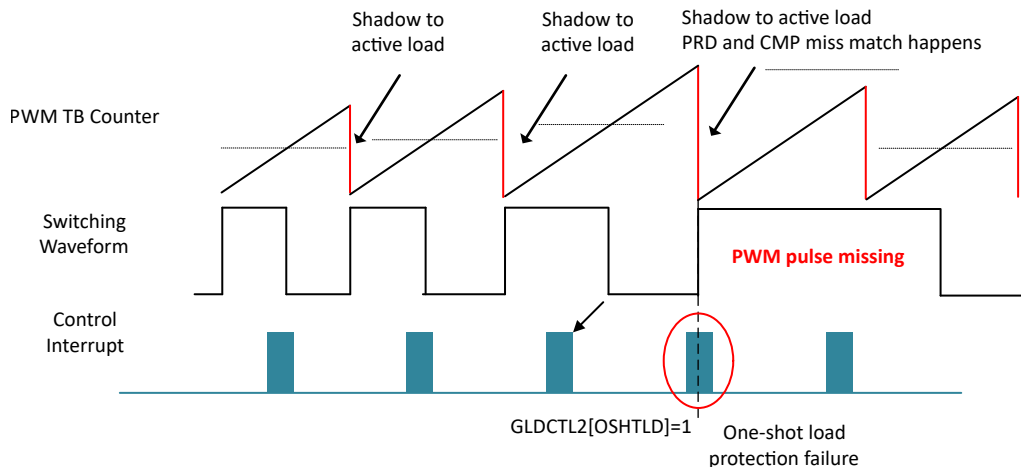


图 3-1. LLC 转换器中的 PWM 障碍

在实际的 LLC 应用中，为了达到更好的瞬态性能，开关频率范围选择为宽范围。例如，20kHz 至 200kHz 是服务器 PSU 行业通常使用的开关频率，而 100kHz 是典型的控制环路 ISR 频率。在 LLC 以低开关频率工作的瞬态期间，可能会在同一开关周期内发生多个控制 ISR。按照建议的一次性加载操作，在第一个控制 ISR 中将 GLDCTL2[OSHTLD] 设置为 1。在下一个 CTR=PRD 时，将会响应全局加载，并清除 GLDCTL2[OSHTLD]。但是，由于开关频率较低，第二个控制 ISR 发生在开关周期结束之前。由于 GLDCTL2[OSHTLD] 已设置，因此一旦 CTR 等于 PRD，就会发生影子到活动加载。在这种情况下，一次性加载将不工作，并且可能发生 PWM 障碍，如节 2.1 中所述。

3.1 软件权变措施

通过以下方法可实现简单的权变措施：

```
while(EPwm1Regs.TBCTR > (EPwm1Regs.TBPRD - PwmUpdateTime))
{
    // wait in while if there is no enough time for PWM register update.
    PWMRegsUpdate(); //Function to update PWM shadow registers. Make sure to put all register updating
    code here before setting global load one-shot bit
    EPwm1Regs.GLDCTL2.all = 1;
}
```

其中 PwmUpdateTime 是一个常数，表示为 PWM 影子寄存器写入保留的时间周期。

这样可以保留 PWM 周期结束前的一段时间。如果 PWM 更新发生在保留期内，CPU 将在 while 循环中运行，直到保留期过后才对 PWM 影子寄存器进行写入。这样，即使 GLDCTL2[OSHTLD] 由上一个 ISR 在同一个开关周期内置位，也不会发生不匹配的 PWM 寄存器更新。

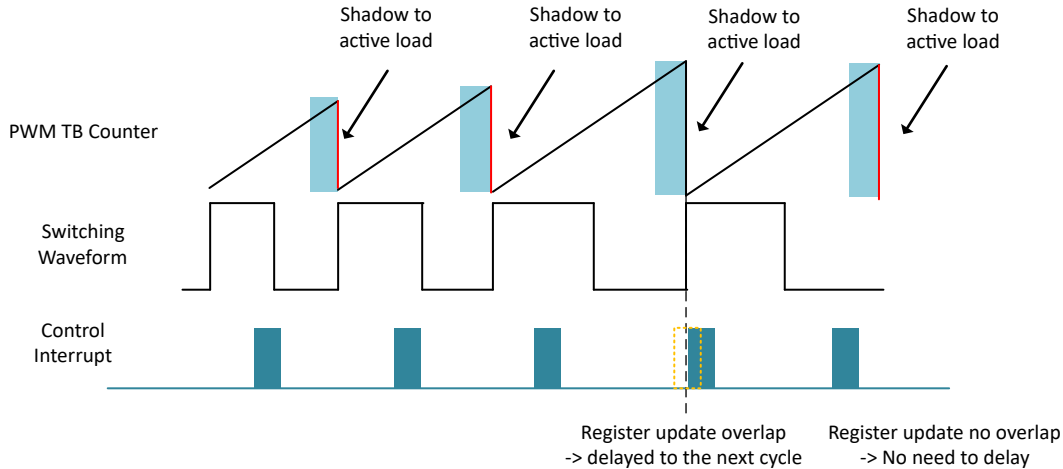


图 3-2. 软件权变措施

3.2 基于 CLB 的硬件权变措施

尽管软件权变措施很简单，但需要额外的代码和 CPU 带宽来监控 PWM 时基计数器，并且需要花费 CPU 周期来等待可用于 PWM 寄存器更新的时机。对于典型的寄存器更新，包括 TBPRD、CMPx 和 TBPHS 寄存器，需要大约 50 个 CPU 周期，对于 100MHz CPU 这相当于大约 $0.5\ \mu\text{s}$ ，占 100kHz 中断的 5%。

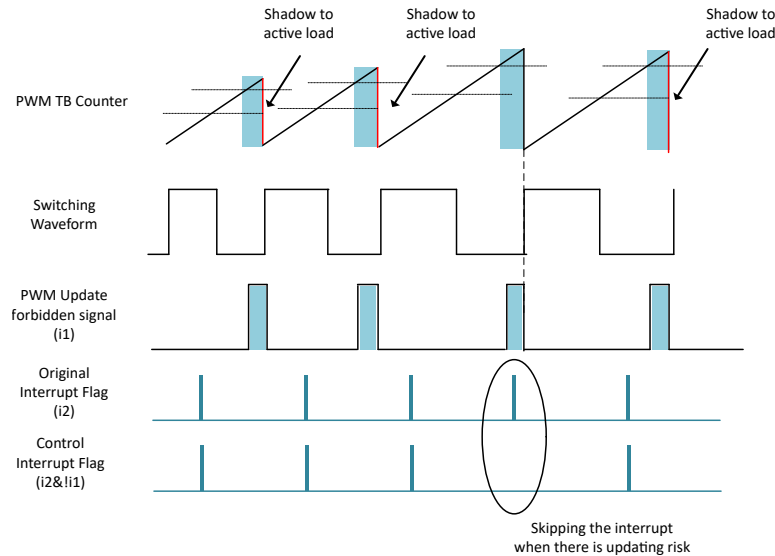


图 3-3. CLB 权变措施方框图

另一个选项是在可配置逻辑块 (CLB) 中实现 PWM 更新嵌套逻辑。该解决方案向 CLB 中引入了原始控制中断信号和 PWM 更新禁止信号，并生成另一个 CLB 中断以触发实际控制环路中断。借助 CLB 内的逻辑，在 PWM 更新禁止信号期间发生的所有原始控制中断都将嵌套，因此不会触发任何控制环路中断，并将杜绝发生 PWM 紊乱的所有风险。

CLB Tile Configuration

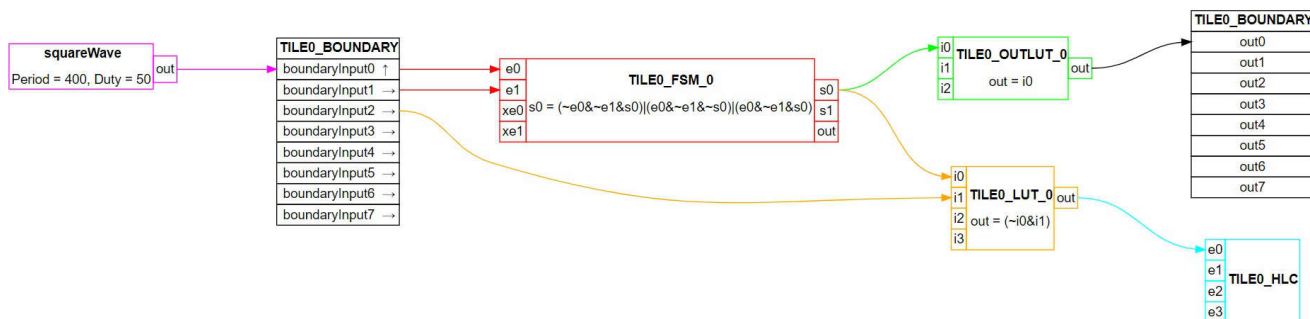


图 3-4. CLB 逻辑块配置

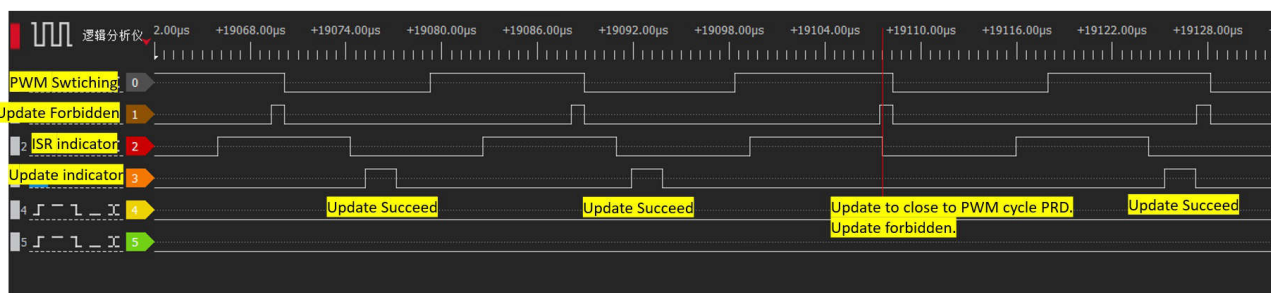


图 3-5. CLB 权变措施测试结果

4 总结

本应用手册讨论了在谐振转换器中使用 4 类 PWM 所面临的挑战。即使使用 PWM 全局和一次性负载等高级新功能，仍存在一些因 PWM 设置不正确或 PWM 外设缺陷而产生意外 PWM 波形的情况。人们提出了基于 CLB 的软件和硬件解决方案来应对 PWM 异常挑战。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI) : [TMS320F28004x 实时微控制器技术参考手册](#)
- 德州仪器 (TI) : [利用新型 ePWM 特性进行多相控制](#)
- 德州仪器 (TI) : [使用 C2000™ 可配置逻辑块进行设计](#)
- 德州仪器 (TI) : [在 C2000™ 4 类 PWM 上实现三相交错型 LLC](#)

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司