

Technical White Paper

优化 CLLLC 中的同步整流方案



摘要

本文分析了同步整流方案的问题，即，当次级整流器开关和初级有源开关同时导通时，如果开关频率大于谐振频率，整流器开关会提前导通的问题。

本文建议使用时域分析公式来计算整流器开关开通时间与初级侧开关开通时间的延迟，从而确认整流器开关正常打开。

内容

1 背景.....	1
2 同步整流策略的问题.....	2
3 解决方案.....	4
4 仿真验证.....	5
5 结语.....	7
6 参考资料.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 背景

在储能系统 (ESS) 中，通常使用双向隔离式直流/直流电源对电池进行充电和放电。

在不同的隔离式双向直流/直流拓扑中，LLC 谐振转换器可以在满负载范围内轻松实现软开关，因此在高效率应用中具有明显的优势。CLLLC 拓扑基于 LLC 拓扑，它在次级侧添加了谐振回路，以便在正向和反向模式下实现对称增益。

在传统的双向 CLLLC 谐振转换器中（如图 1-1 所示），MOSFET 的体二极管形成一个不受控制的整流网络。与快速恢复二极管相比，体二极管具有更大的反向恢复电流、更长的反向恢复时间、更高的压降以及更低的额定导通电流，从而导致效率严重下降。

解决此问题的有效方法是使用同步整流 (SR) 技术。通过在整流网络中将体二极管替换为 MOSFET，电流现在会流过 MOSFET 通道。MOSFET 具有小导通电阻，可有效减少整流导通损耗。

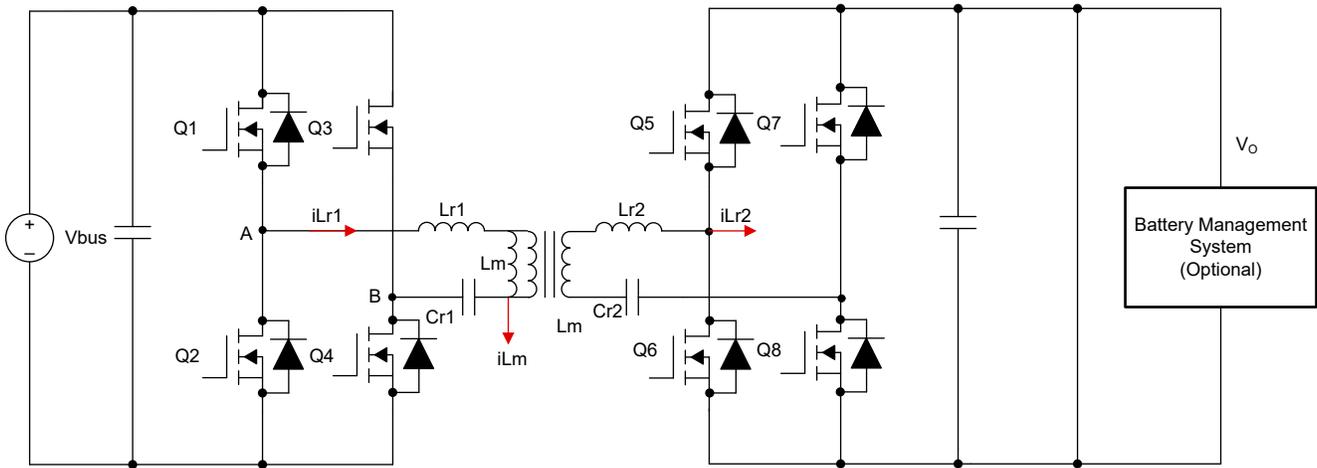


图 1-1. ESS 中的 CLLC 拓扑

传统的同步整流策略可分为以下几类：

1. **电流类型。** 电流传感器使用电流类型来获取与整流器电流同相的电压，作为同步整流驱动信号。电流类型同步整流策略可用于大多数拓扑，且易于实现，但需要一个或多个电流传感器，这会增加成本和体积。
2. **电压类型。** 检测整流器开关管的漏源电压，作为同步整流驱动开关的基准信号，此策略已应用于许多商用同步整流芯片，如 [UCC24624](#)。基于电压的同步整流策略不需要额外的电流传感器，但漏源电压信号的检测受开关封装的寄生电感和检测路径上的电感的影响。

2 同步整流策略的问题

为了减少传感器数量，我们提出了一种基于次级侧电流采样与初级侧驱动信号相结合同步整流策略。以 CLLC 谐振转换器的正向运行为例，假设转换器在升压模式 ($f_s < f_r$) 下运行，如图 2-1 所示。

同步整流器开关 Q_5 和 Q_8 与 Q_2 和 Q_3 同时导通，且当检测到 i_{Lr2} 为 0 时，开关关闭。如图所示，虽然在此模式下这些操作不是问题，但如果转换器在过谐振模式 ($f_s > f_r$) 下工作，则会出现问题。

如图 2-2 的右上角图所示，在从 t_1 到 t_3 的死区时间中，在 t_2 时刻 $i_{Lr1} = i_{Lm}$ ，导致次级侧电流开始换向，且在 t_3 时刻 Q_2/Q_3 现在会导通。此时导通次级侧整流器开关没有问题，但这样的情况确实存在，如图 2-2 的右下角图所示。死区时间相对较短，因为直至死区结束， i_{Lr1} 仍然大于 i_{Lm} 。此时， Q_2/Q_3 导通 (t_2)，且 i_{Lr1} 仍然大于 i_{Lm} ，直至等于 i_{Lm} (t_3)。此时，如果仍使用原始逻辑，则次级侧会开始换向。当同步整流器开关与 Q_2/Q_3 一起导通时，开关提前导通，导致电流波形出现振荡。

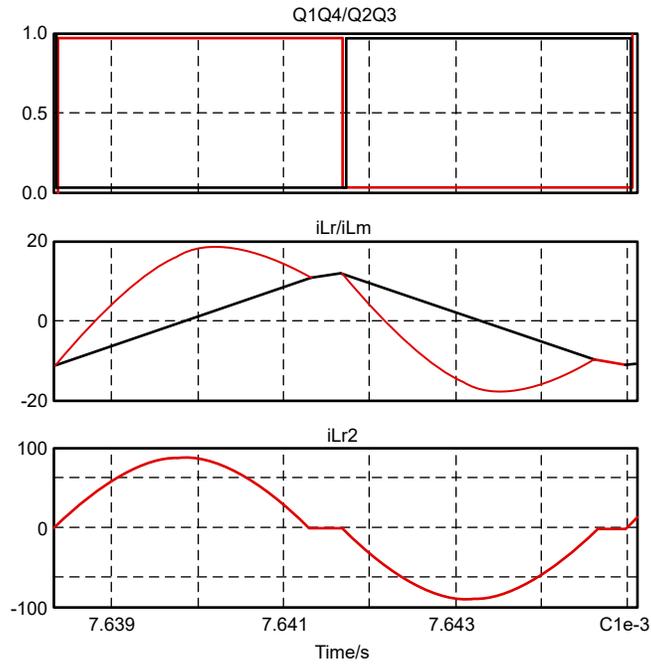


图 2-1. $f_s < f_r$ 时的电流波形

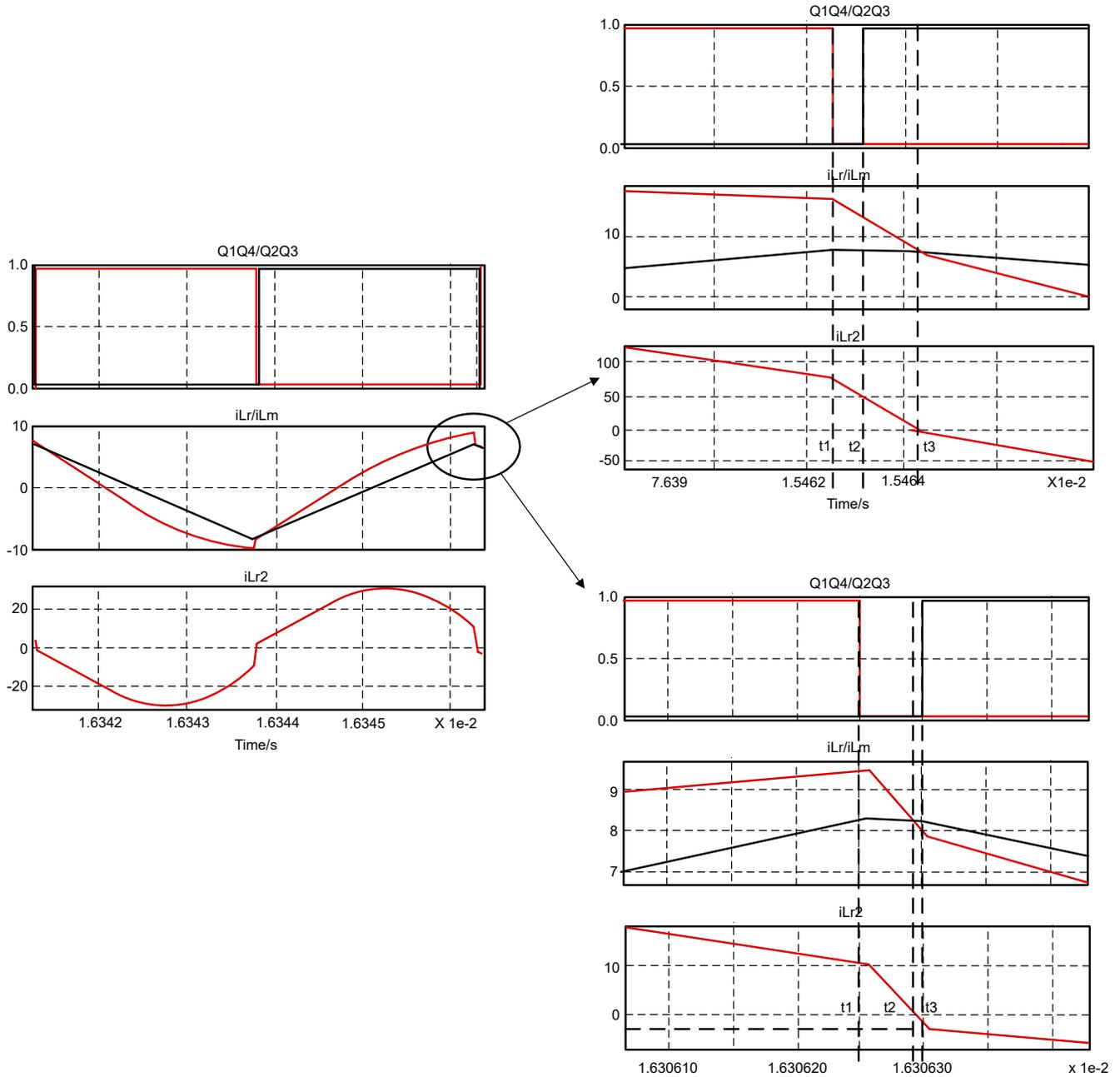


图 2-2. $f_s > f_r$ 时的电流波形

因此，在这样的情况下，必须提供可接受的延迟，以便确保 SR 不会提前导通。

3 解决方案

LLC 转换器分析的许多文献都使用一次谐波近似 (FHA) 方法，该方法在设计中具有一定的指导作用，但无法准确分析模式。要直接计算图 3-1 中 $0 - t_1$ 的长度，请使用时域分析方法。具体分析过程非常复杂，您可以参考 LLC 串联谐振转换器的稳态分析文章中所述的过程 (1)。时域分析的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \gamma - \phi, \quad \alpha_3 = \gamma + \phi \\
 \sin(\phi) &= \gamma l M \cos(\gamma) + M \sin(\gamma) \\
 M &= \frac{v_0}{v_{in}}, \quad \gamma = 2\omega_0 \frac{T_s}{2} = \frac{2\pi}{F}, \quad F = \frac{f_s}{f_0}, \quad l = \frac{L_r}{L_m}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中：

- V_o 是输出电压
- V_{in} 是输入电压
- f_s 是开关频率
- f_0 是谐振频率
- L_r 是谐振电感
- L_m 是磁化电感。

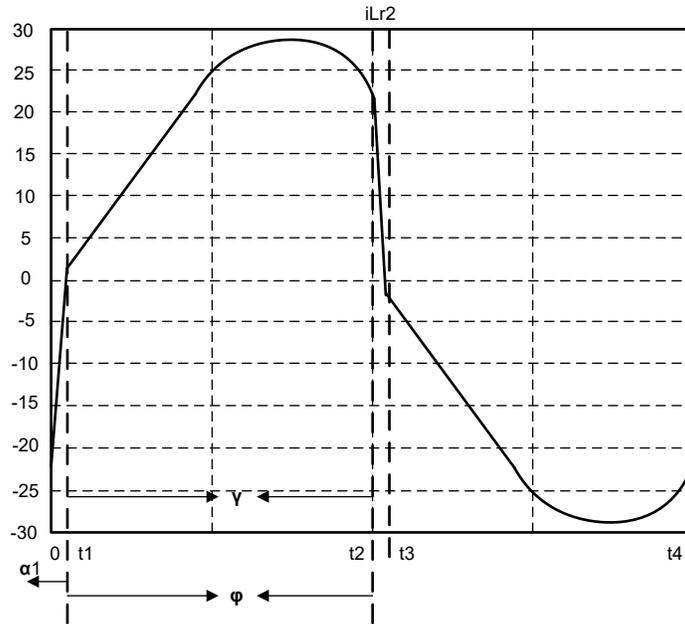


图 3-1. 当 $f_s > f_r$ 时的详细波形

4 仿真验证

为了验证计算结果的准确性，表 4-1 展示了仿真中的三组参数，用于观察实际的时间长度，如图 4-1、图 4-2 和图 4-3 所示。

表 4-1. 不同条件下的参数

V_{in}	400V	400V	400V
V_o	40V	42V	40V
f_s / f_r	212kHz/170kHz	235kHz/170kHz	265kHz/170kHz
L_r / L_m	10uH/56uH	10uH/56uH	10uH/56uH
α_1 (仿真值/计算值)	2.22e-7/2.25e-7s	7.76e-8s/7.79e-8s	9.77e-8s/9.81e-8s

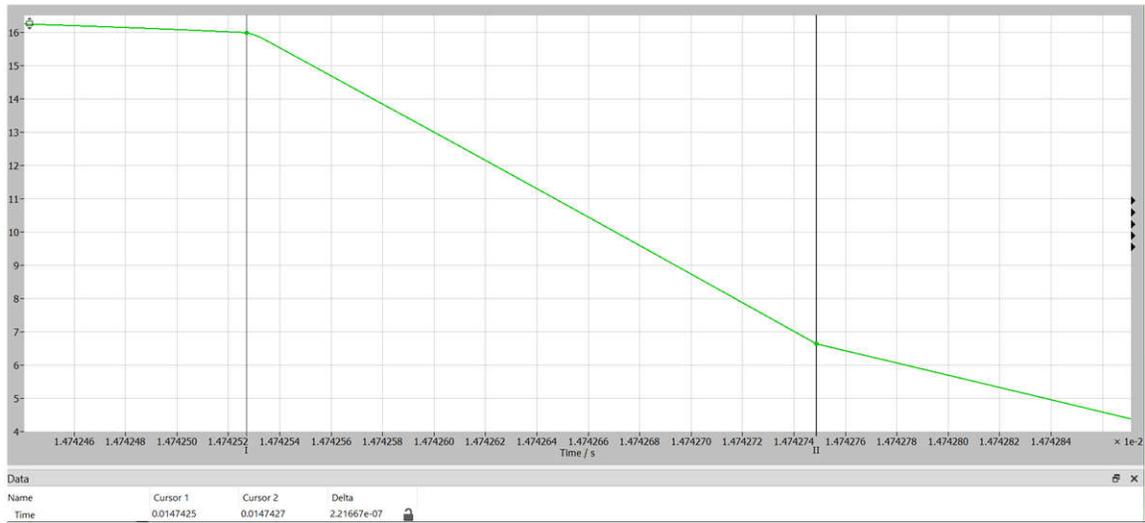


图 4-1. 第一组参数的波形

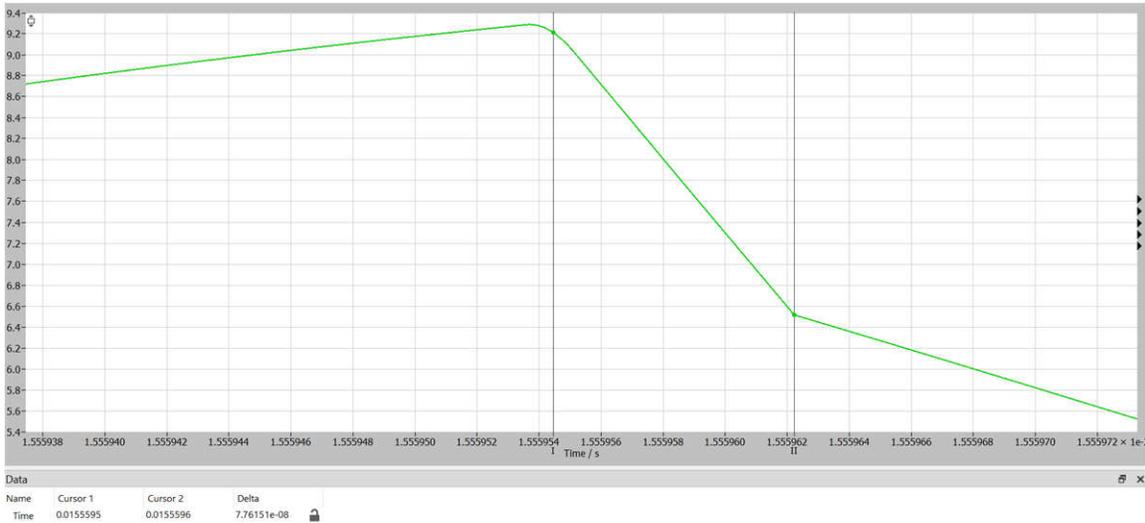


图 4-2. 第二组参数的波形

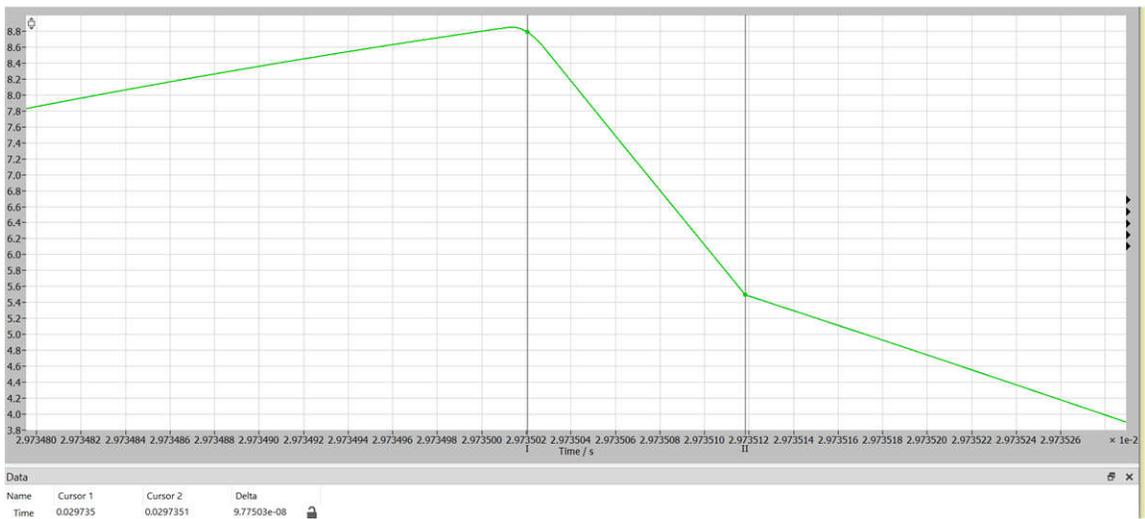


图 4-3. 第三组参数的波形

根据仿真结果进行的计算相对准确，这意味着您可以根据这些计算结果设置延迟。

如果死区时间设置为 100ns，则在 α_1 大于 100ns 时为 SR 启动时间设置延迟，延迟时间为 α_1 减去死区时间。图 4-4 展示了不同输出电压和负载下的时间曲线 α_1 ，这表明最坏情况发生在输出电压最低、负载最重的情况下。

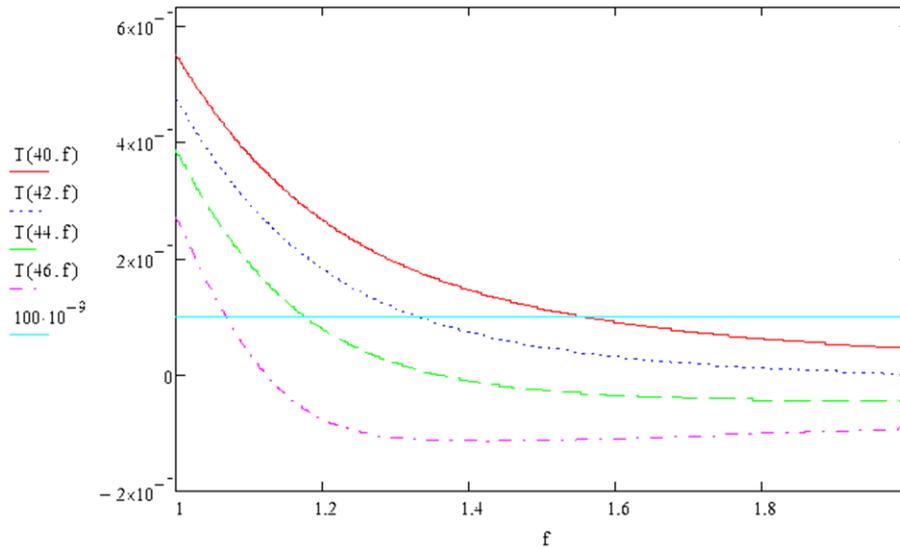


图 4-4. 不同输出电压和频率下的时间曲线

5 结语

本文分析了同步整流方案的问题，即，当次级整流器开关和初级有源开关同时导通时，如果开关频率大于谐振频率，整流器开关会提前导通的问题。

本文建议使用时域分析公式来计算整流器开关开通时间与初级侧开关开通时间的延迟，从而确认整流器开关正常打开。

6 参考资料

1. J. F. Lazar 和 R. Martinelli, “Steady-state analysis of the LLC series resonant converter”, *APEC 2001*. 第十六届年度 IEEE 应用电力电子会议暨博览会 (目录编号 01CH37181), 第 2 卷, 2001 年 3 月, 第 728 - 735 页。

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