

# 使用低边和高边整流器实现低 EMI 的变压器结构

作者: Bernard Keogh, 爱尔兰科克市高电压控制器系统工程师

Max (Jun) Wang, 中国上海电力输送应用工程师

## 简介

为了提高触摸屏的灵敏度和性能,许多适配器和充电器设计都对电磁干扰(EMI)滤波器中的Y电容容值进行限制,从而降低泄漏电流。要降低Y电容容值,通常需要在EMI滤波器中使用损耗较高的更大共模(CM)扼流圈,这不仅会增加适配器的成本、尺寸和重量,还会降低其效率。

基于高频氮化镓(GaN)的有源钳位反激式适配器设计通过使用TI的UCC28782控制器,即使在使用低容值Y电容的情况下,也能降低CM EMI并符合EMI标准。本文介绍了该设计的内部变压器结构及其对CM EMI的影响。此外,还分析了应如何针对低边整流器和高边整流器更改此设计。最后,给出了在低边整流器中采用合适的变压器架构的EMI测试结果。

## CM EMI 的产生原因

CM EMI是交流线L端和N端与地面之间流动的高频电流。交流线馈电电缆与电源输出电缆共同传输电源生

成的CM EMI信号。为避免干扰附近的无线电通信,必须衰减CM噪声振幅才能满足所要求的EMI标准限制。

如图1所示,CM电流通过与每个开关节点关联的寄生电容,可直接从电源电路流到地面。CM电流还可通过变压器绕组间的寄生电容从初级绕组流至次级绕组。CM性能与印刷电路板布局布线、机械构造以及变压器的内部结构密切相关。

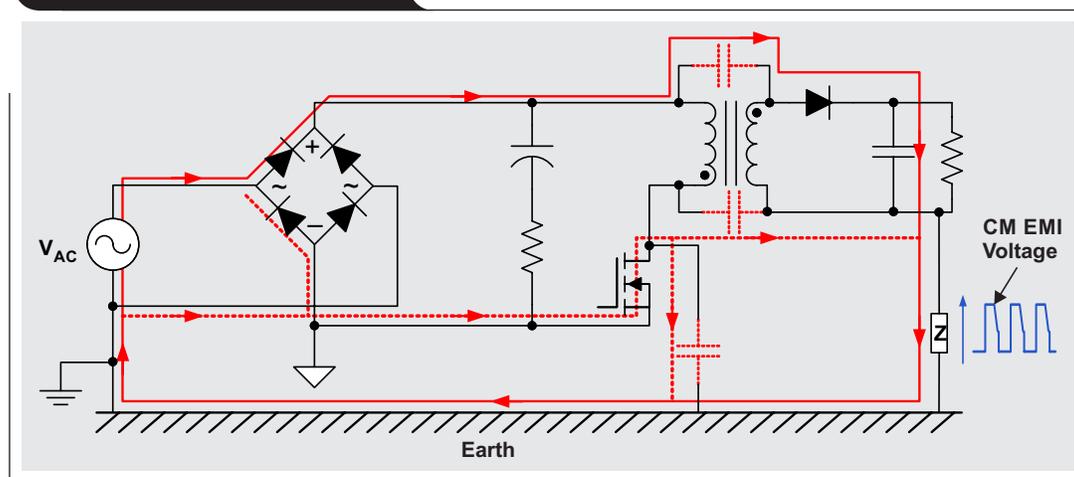
## 减小CM EMI

抑制CM噪声主要有三种方法:

- 屏蔽CM噪声发生源。
- 排布电源电路,尤其是变压器,以实现平衡来降低CM噪声。
- 通过充分的滤波处理限制CM噪声。

变压器的内部绕组层有两种可能的平衡排列方式,可降低CM噪声。一种是使用高边同步整流器(SR),另一种是使用低边SR。

图 1. CM 噪声电流路径



### 变压器结构及其对 CM EMI 的影响

图 2 是典型交错反激式变压器的横截面。图 3 显示了此变压器内部如何连接到使用低边或高边 SR 的有源钳位反激电路功率级中。图 3 还显示了每个绕组层两端的感应电压。高边 SR 和低边 SR 两者间的唯一显著差异是次级绕组两端的电压极性，前者的次级绕组电压与初级电压同相，而后者与初级电压异相。

设计人员经常使用 SR 场效应晶体管 (FET) 而不是二极管来提高整流器的效率。将 SR FET 放在低边使用简单，可采用简单的驱动和采样电路，但缺点是次级绕组电压的极性反转会增加 CM 噪声。

图 2. 无屏蔽或 CM 噪声消减功能的典型交错反激式变压器

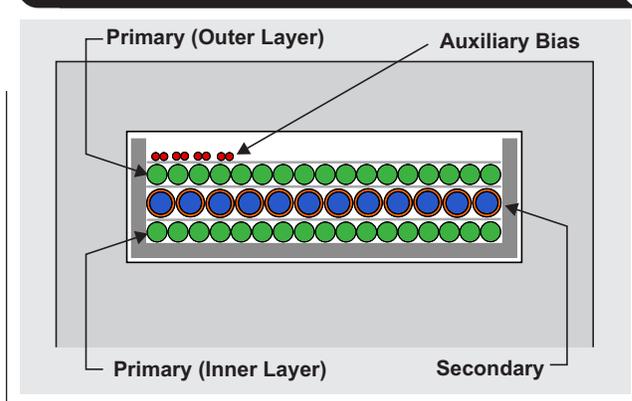


图 3. 有源钳位反激式电路的变压器连接和绕组电压

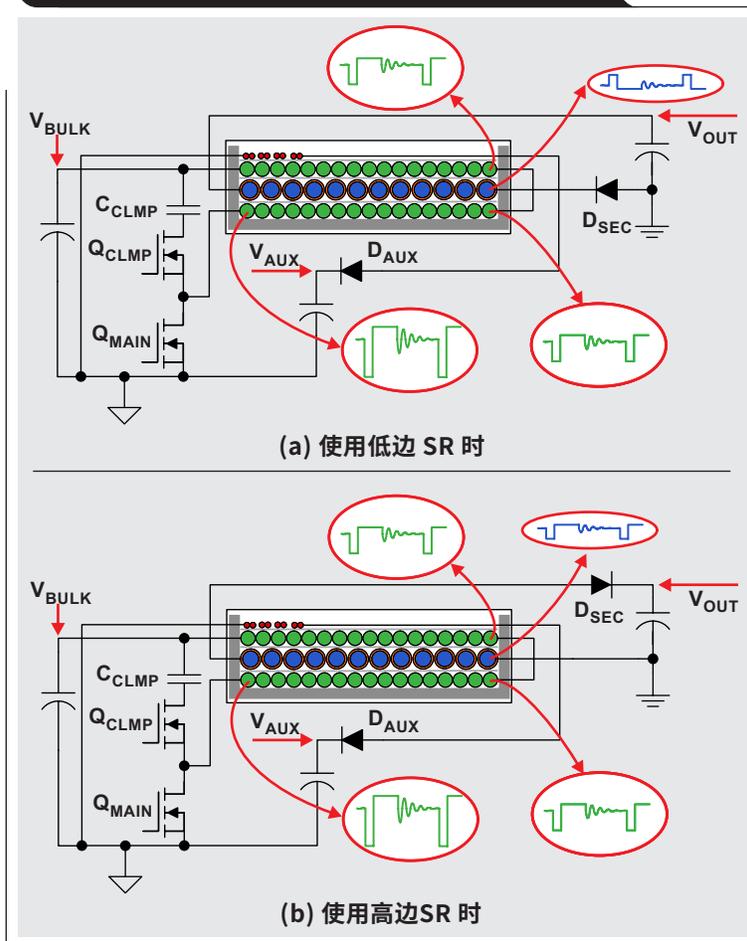


图 4 显示了将每个绕组层替换为矩形方框 (电压等于每层平均电压) 的简化变压器结构。还显示了绕组层之间的寄生电容和各电容电压。如果使用低侧 SR, 次级电压则相对于初级绕组层反向摆动, 对初级和次级绕组层间的 CM 电压带来净累加效应。

高边 SR 具有一定的优势, 因为所有电压都具有相同的极性, 这样会通过降低初、次级绕组之间的 CM 净电压产生一定的消除作用。高边 SR 的自然 CM 消除程度取决于初级与次级绕组层的相对电压、绕组层数量及其排列方式。

### 低边 SR 与高边 SR 的变压器 CM EMI 降低

如需尽可能将净 CM 电压降低到 0, 需要对变压器结构进行轻微改动, 如图 5a 所示。次级绕组夹在两个辅助层之间, 可实现屏蔽和 CM 平衡。外部的初级辅助偏置绕组 (红色显示) 移动到内侧, 位于其中一个初、次级绕组界面之间。辅助偏置层与次级绕组层具有相同的匝数, 但因其所需的额定电流很低, 通常使用较细的电缆缠绕。使

用多股较细的并行线束缠绕辅助层可完全填补层间隙, 使辅助层发挥屏蔽作用, 并防止外部初级绕组层与次级绕组层之间发生任何 CM 噪声耦合。

对于高边 SR, 将相同的辅助层置于另一个初、次级绕组层界面之间 (这是一个虚拟的 CM 平衡绕组), 也可以屏蔽初级主绕组产生的 CM 噪声。但是, 由于 CM 平衡绕组具有与次级绕组层和辅助偏置层相同的匝数, 因此, 次级绕组层就实现了 CM 平衡。次级绕组层被两个辅助绕组层 (每侧一个) 有效屏蔽, 在全部三个绕组层上感应出完全相同的电压。由于全部三个绕组层都具有相同的感应电压, 因此流入次级绕组层的 CM 电流接近 0。此结构所产生的 CM EMI 非常低, 因此需要的外部的 CM 滤波器尺寸更小。

图 5b 中的简化横截面图显示了等效为电容极板的绕组层, 每个电容极板上的电压都相同。图中还呈现了在每个寄生电容的两侧都具有相同电压的情况下, 从每个辅助绕组层流入次级绕组层的 CM 电流为什么会接近 0。

图 4. 简化的有源钳位反激式变压器结构和 CM 电压

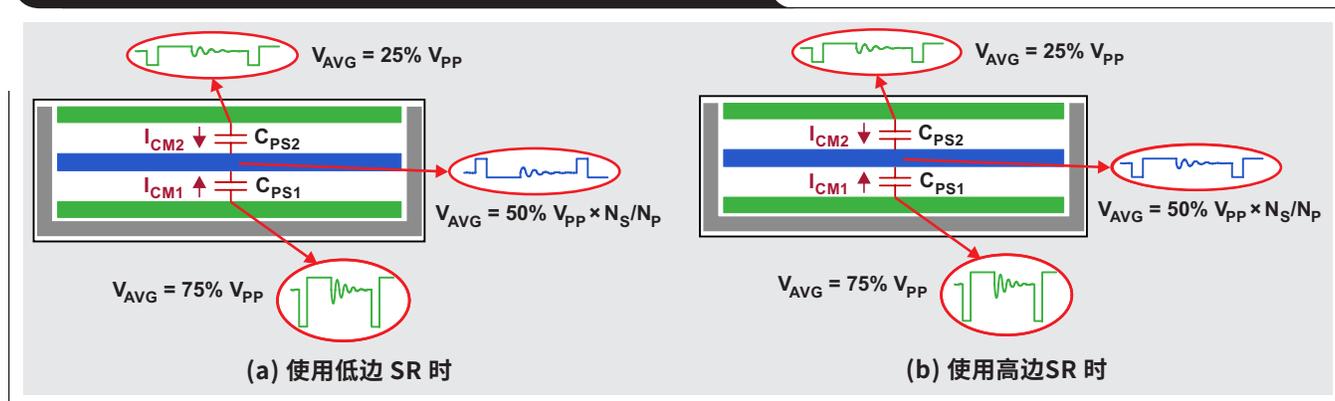
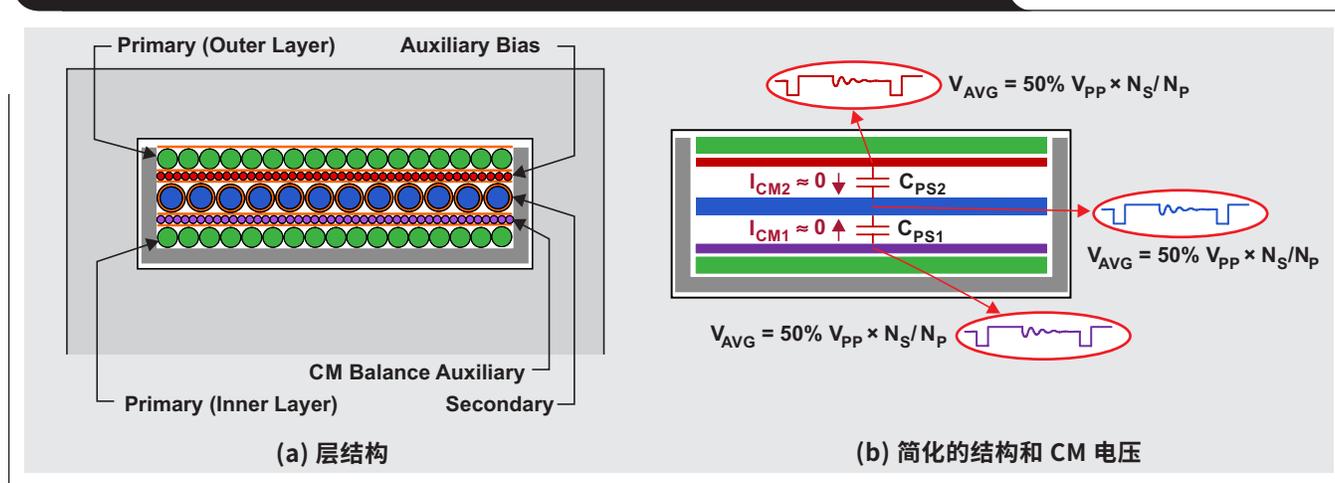


图 5. 改良后的具有内部屏蔽和 CM 平衡功能的有源钳位反激式变压器



低边SR 使用相同架构的变压器。然而在这样的应用中，由于辅助和次级绕组层具有相反的极性，因此，净CM 信号是累加的。位于另一个初、次级绕组界面的辅助CM 平衡层也使用多股线束并行缠绕，以填充层间隙进行屏蔽。但是，辅助CM 平衡层需要更多匝数才能消除辅助偏置层和次级绕组层之间CM 电流的影响。

公式 1 说明了如何计算电流影响消除层中的额定绕组匝数。公式将次级绕组层极性反转考虑在内，最终结果明确显示了累加效应。在此示例中，由于次级绕组和辅助偏置绕组均缠绕了 5 匝，电流消除层需要15匝。这远远超出了在高边SR中电流消除层所需的 5 匝绕组。实际上，辅助电流消除层通常需要比公式 1 计算值更多的匝数，要找到最优值，通常需要进行一些迭代运算。

$$N_{cancel} = N_{aux\_bias} - (-N_{sec}) - (-N_{sec}) \quad (1)$$

$$= N_{aux\_bias} + 2N_{sec}$$

设计人员可以采用图 5 所示之外的许多其他结构，从而为其他应用实现相似的 CM 平衡。最终结构将取决于

以下因素：成本（由于电流消除层会增加变压器的制造成本）、漏电感（初、次级绕组层之间的额外层会增加漏电感）、变压器寄生电容和量产解决方案的可重复性。

### EMI 测试结果

图 6 和图 7 显示了为低边 SR 的最终设计得到的传导 EMI 结果。请注意，该结果是符合欧洲标准 (EN) 55032 B 类限制，还有较好的裕度。平衡变压器结构本身就具有较低的 CM EMI，因此可将低容值（仅 330pF）Y 电容用于 CM EMI 滤波器，同时仍满足 EN 55032 B 类 EMI 标准限制，并具有裕度。若采用 CM 平衡变压器结构，高边 SR 也可实现相似的结果。

由于大容量电容具有低电压纹波，以及半个交流周期内开关频率变化随之减少，消除了“自由”频率抖动，因此高压线输入电压 (230V<sub>AC</sub>) 通常成为 EMI 瓶颈。UCC28782 在高压侧内置的频率抖动特性有助于减少 EMI 并可以增加通过裕度，从而进一步支持灵活地使用低容值 Y 电容。如图 6 和图 7 所示，低压线 and 高压线都实现了相似的裕度。

图 6. 低边 SR 在 115V<sub>AC</sub>、65W 负载下的最终传导 EMI 结果

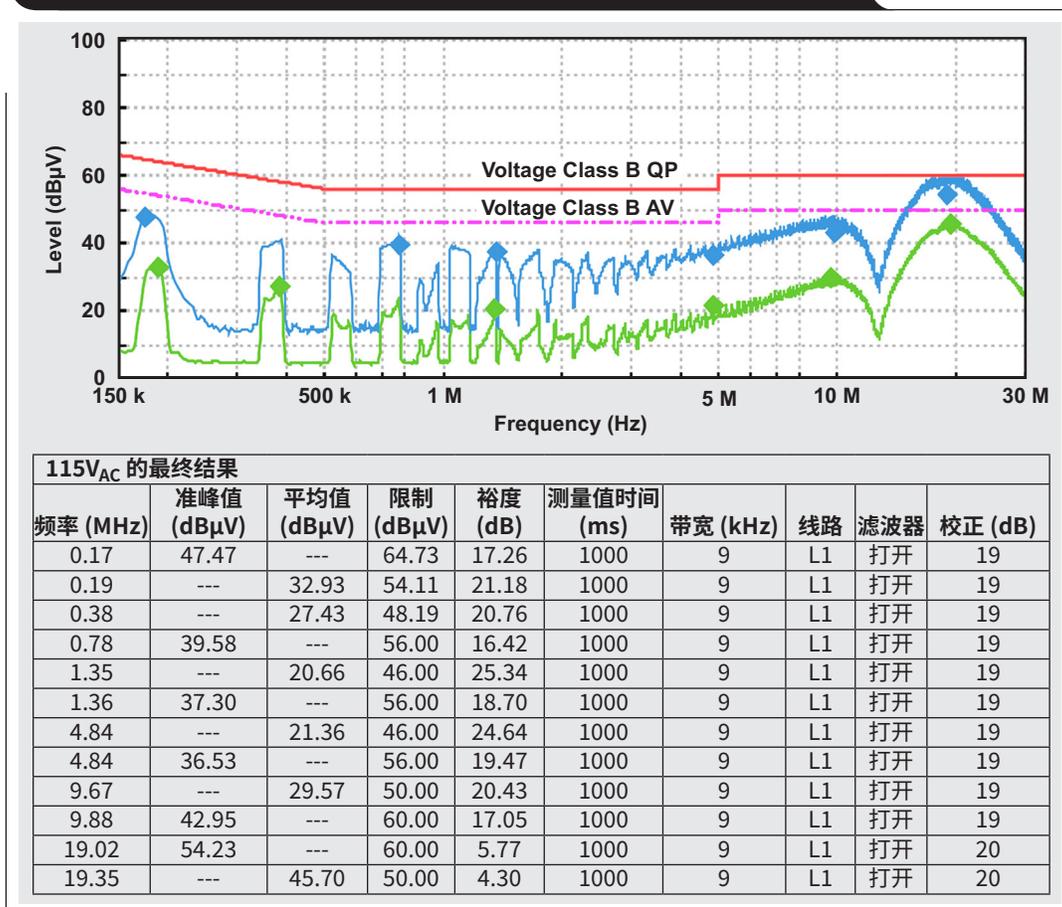
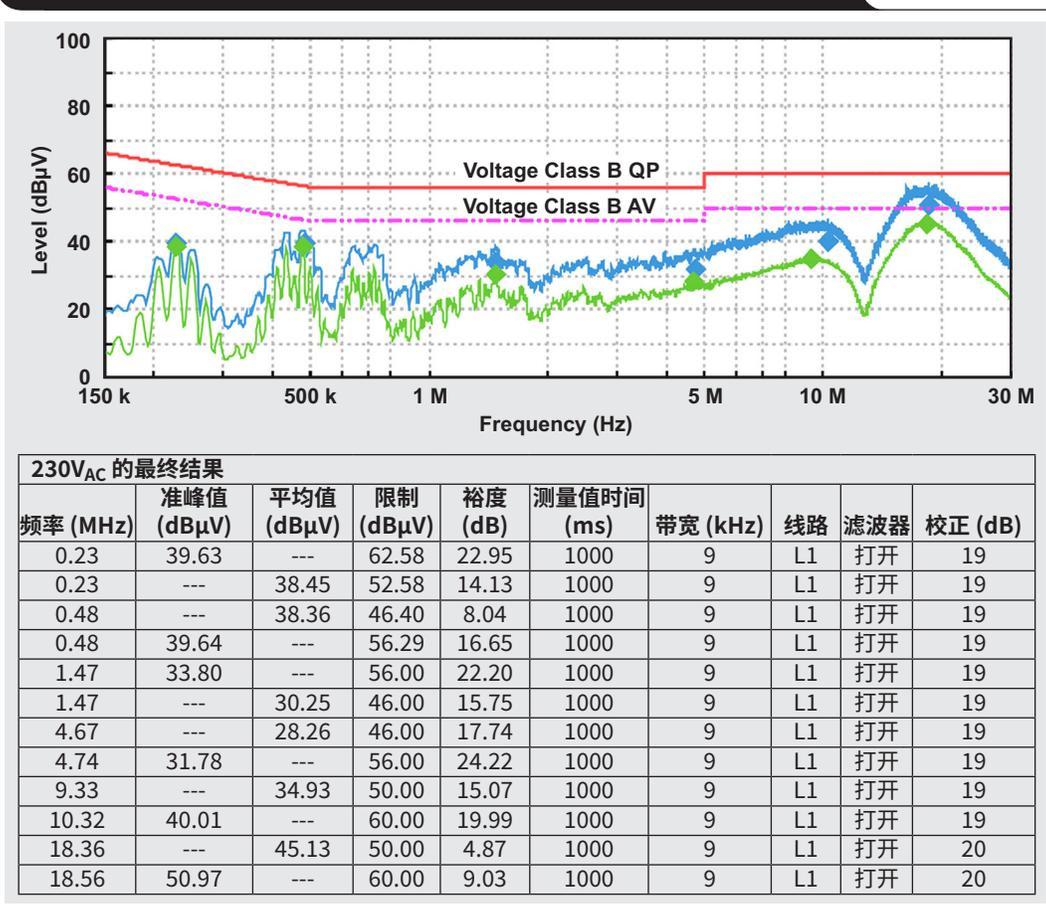


图 7. 低边 SR 在 230V<sub>AC</sub>、65W 负载下的最终传导 EMI 结果



### 结束语

反激式变压器的结构确实会对 CM EMI 产生影响。要更大程度地消除 CM EMI, 必须根据整流器的位置对变压器的结构进行调整。通过研究整流器位置如何影响 CM EMI 的产生, 我们了解了为何必须要改变变压器结构来减少对应的 CM EMI。与采用低边 SR 的设计相比, 高边 SR 的低 CM 噪声信号可让变压器的内部结构更简单。

此反激式变压器结构本身具有较低的 CM EMI, 因此, 设计人员可在 EMI 滤波器中使用低容值 Y 电容。这非常适用于为提高分辨率和灵敏度而要求低泄漏电流的触摸屏应用。

### 参考文献

1. Bernard Keogh 和 Joe Leisten, “低功率交流-直流电源的 EMI 应用注意事项”, TI 电源设计研讨会 SEM2400 (SLUP394), 2020 年 11 月。
2. Bernard Keogh 和 Isaac Cohen, “反激式变压器设计在效率和 EMI 方面的注意事项”, TI 电源设计研讨会 SEM2200 (SLUP338), 2017 年 11 月。
3. Bob Mammano 和 Bruce Carsten, “了解并优化开关模式电源的电磁兼容性”, TI 电源设计研讨会 SEM1500 (SLUP202), 2002 年 11 月。

### 相关网站

- 产品信息:  
**UCC28782**  
**UCC28782 有源钳位反激式评估板**  
**UCC28780**  
**UCC28780 ZVS 反激式参考设计**

## TI 全球技术支持

### TI 支持

感谢您的订购。要查找有关您支持需求的答复或联系我们的支持中心, 请访问

[www.ti.com.cn/support](http://www.ti.com.cn/support)

中国: <http://www.ti.com.cn/guidedsupport/cn/docs/supporthome.tsp>

日本: <http://www.tij.co.jp/guidedsupport/jp/docs/supporthome.tsp>

### 技术支持论坛

在 TI 的 E2E™ 社区 (工程师对工程师) 中搜索数百万个技术问题和答案, 请访问

[e2e.ti.com](http://e2e.ti.com)

中国: <http://www.deyisupport.com/>

日本: <http://e2e.ti.com/group/jp/>

### TI 培训

从技术基础到高级实施, 我们提供点播和直播培训以帮助您实现下一代设计。即刻体验, 请访问

[training.ti.com](http://training.ti.com)

中国: <http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/gencontent.tsp?contentId=71968>

日本: <https://training.ti.com/jp>

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

A011617

E2E 是德州仪器 (TI) 的商标。所有其他商标均属于其各自所有者。

© 德州仪器 (TI) 公司 2020 年版权所有。  
保留所有权利。



ZHCT336

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司